



Tesis Doctoral

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

Dirigida por
Dr. Pablo Aragonés Beltrán
Dr. Juan Pascual Pastor Ferrando

Realizada por
Jesús Montesinos Valera
Valencia, Julio 2015

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

Agradecimientos:

Realizar una tesis doctoral no es el trabajo de una sola persona y muchos han contribuido directa o indirectamente a que esté terminada.

En mi primer lugar agradecer a mis directores de tesis, Pablo Aragonés Beltrán y Juan Pascual Pastor Ferrando, que siempre han estado disponibles y me han dado ánimos en los momentos mas difíciles.

A mis jefes en ADIF durante el periodo de elaboración de la tesis, Rafael Elsel Saavedra primero y Pedro Martínez Padrón después, por colaborar directamente, ayudarme en la recopilación de datos y darme todo el apoyo posible para poder completar el trabajo.

A Carolina por el apoyo y comprensión y a mi pequeña Inés, que nació durante estos años, y a la que le he robado tardes y tardes de juegos.

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

Abstract

The construction of railway infrastructure networks requires heavy investment, long planning and execution times and extended life cycles.

An important family of projects in Railway Engineering are the Maintenance, Renewal and Improvement (MR&I) projects. They are critical to maintaining railway infrastructures in good condition and to adapt them to environmental changes and new operating conditions and needs. MR&I action plans have a great impact in the short term because they affect the performance of operating facilities. A critical issue for public infrastructure managers and planners is the effective allocation of the scarce resources available for maintenance and repair of railway infrastructures. Obsolescence and lack of adequate maintenance and repair of the railway network affect productivity and lead to increased costs over time.

Every year the Manager of a rail network area is faced with different MR&I needs. This involves different projects to be executed with different levels of urgency, different levels of investment and different improvement measures and action plans on the railway network. Therefore, the Manager has a portfolio of MR&I projects and a limited budget. The main problem that the manager faces is setting priorities among the projects to decide which ones will be executed first. It is a complex problem due to the number of different projects and criteria to be considered.

Classical approaches are based upon the Cost Benefit analysis (CBA) but there are great uncertainties and variations between the economic values used in different models and the results

are heavily dependent on the specific methodology adopted. Methods based upon Multiple Criteria Decision Analysis (MCDA) allow mixing quantitative and qualitative criteria, aggregate multiple experts evaluations and, in general, obtain more robust project rankings than CBA. There is little evidence in the scientific literature of the use of MCDA to similar cases.

Research conducted in this thesis studies the decision-making process to choose MR&I projects in a railway network. Technicians and managers are given a methodological tool to help them establish a priority between all the projects in the MR&I portfolio. The problem is addressed as a Multi criteria decision making (MCDM) problem in which three different ANP models have been used, comparing the results obtained with all of them: Analytic Hierarchical Process (AHP), Analytic Network Process with subnetworks for Benefits and Costs (ANP-BC) and the Analytic Network Process with subnetworks for Costs, Benefits, Opportunities and Risks (ANP-BOCR)

The main contributions of this works are:

- Deep analysis of the decision criteria.
- Design of a procedure for evaluating many different alternative projects.
- A decision making process which is both systematic and strict has been obtained. It can be generalized to other areas of the railway infrastructure management company.

Thanks to the results the budget can be used in the best-valued projects according to the criteria established by the decision maker. The prioritization is then obtained in a transparent and documented way.

Resumen

La construcción de infraestructuras ferroviarias requiere de grandes inversiones, largos plazos de planificación y ejecución y los ciclos de vida totales son muy largos también.

Dentro de los proyectos que se realizan en este tipo de infraestructuras, una parte muy importante son las actuaciones sobre líneas en servicio, que se denominan actuaciones de mantenimiento, rehabilitación y mejora (MR&I por sus siglas en inglés de Maintenance, Renewal and Improvement). Las actuaciones de MR&I tienen un gran efecto a corto plazo al afectar al rendimiento de instalaciones que ya están en servicio en el momento de la actuación. La asignación eficaz de los escasos recursos disponibles para MR&I por parte de los gestores de infraestructuras es clave para mantener y mejorar el desempeño general de la red.

Cada año el gestor de una zona de la red se enfrenta a diferentes necesidades de mantenimiento, rehabilitación y mejora de la red, por tanto, tiene conjunto muy grande de proyectos de MR&I y un presupuesto limitado para ejecutarlos. El problema que se plantea es seleccionar qué proyectos tienen prioridad a la hora de su ejecución y qué criterios ha de considerar para establecer esa prioridad. Es un problema complejo debido al amplio número de proyectos posibles y de criterios a considerar.

Los métodos clásicos más utilizados se basan en el enfoque de análisis coste-beneficio, pero existen grandes variaciones e incertidumbres a la hora de obtener los valores económicos y los resultados del análisis dependen mucho de la metodología específica adoptada. Los métodos basados en el Análisis Multicriterio de Decisiones (Multiple Criteria Decision Analysis MCDA) permitan integrar valoraciones cuantitativas y

cualitativas, agregar las preferencias de varios expertos y, en general, obtener ordenaciones de proyectos más robustas que el CBA. No existe apenas evidencia de la aplicación de MCDA al problema planteado en la literatura científica.

La investigación presentada en esta tesis estudia el proceso de toma de decisiones para la selección de proyectos de MR&I en una red ferroviaria. Se dota a los técnicos responsables y a los gestores del mantenimiento de los administradores ferroviarios de una herramienta metodológica que les ayude a establecer una prioridad entre la cartera de proyectos de MR&I. El problema se afronta como una toma de decisión multicriterio (MCDM) en la que se han utilizado tres modelos del método ANP, comparando los resultados entre sí: el modelo jerárquico basado en el Proceso Analítico Jerárquico (AHP), el proceso analítico en red con una subred de costes y otra de beneficios (ANP-BC) y el proceso analítico en red con cuatro subredes: beneficios, oportunidades, costes y riesgos (ANP-BOCR).

Las principales contribuciones de este trabajo son:

- El profundo análisis realizado sobre los criterios de decisión.
- Se ha diseñado un procedimiento para evaluar un conjunto muy numeroso de actuaciones alternativas.
- Se ha obtenido un proceso de toma de decisiones riguroso y sistemático que se puede generalizar para otras zonas de gestión de la Compañía Gestora de las Infraestructuras ferroviarias

El resultado permite utilizar el presupuesto en los proyectos mejor valorados de acuerdo a los criterios establecidos por el decisor. Obteniéndose la priorización de forma transparente y documentada.

Resum

La construcció d'infraestructures ferroviàries requereix de grans inversions, llargs terminis de planificació i execució i els cicles de vida totals són molt llargs també.

Dins dels projectes que es realitzen en aquest tipus d'infraestructures, una part molt important són les actuacions sobre línies en servei, que es denominen actuacions de manteniment, rehabilitació i millora (MR&I per les seues sigles en anglès de Maintenance, Renewal and Improvement). Les actuacions de MR&I tenen un gran efecte a curt termini en afectar al rendiment d'instal·lacions que ja estan en servei en el moment de l'actuació. L'assignació eficaç dels escassos recursos disponibles per a MR&I per part dels gestors d'infraestructures és clau per a mantenir i millorar l'acompliment general de la xarxa.

Cada any el gestor d'una zona de la xarxa s'enfronta a diferents necessitats de manteniment, rehabilitació i millora de la xarxa, per tant, té un conjunt molt gran de projectes de MR&I i un pressupost limitat per a executar-los. El problema que es planteja és seleccionar quins projectes tenen prioritat a l'hora de la seua execució i quins criteris ha de considerar per a establir aqueixa prioritat. És un problema complex a causa de l'ampli nombre de projectes possibles i de criteris a considerar.

Els mètodes clàssics més utilitzats es basen en l'enfocament d'anàlisi cost-beneficic, però existeixen grans variacions i incerteses a l'hora d'obtenir els valors econòmics i els resultats de l'anàlisi depenen molt de la metodologia específica adoptada. Els mètodes basats en l'Anàlisi Multicriteri de Decisions (Multiple Criteria Decision Analysis MCDA) permeten integrar valoracions quantitatives i qualitatives, agregar les preferències de diversos experts i, en general, obtenir

ordenacions de projectes més robustes que el CBA. No existeix apenes evidència de l'aplicació de *MCDA al problema plantejat en la literatura científica.

La recerca presentada en aquesta tesi estudia el procés de presa de decisions per a la selecció de projectes de MR&I en una xarxa ferroviària. Es dota als tècnics responsables i als gestors del manteniment dels administradors ferroviaris d'una eina metodològica que els ajude a establir una prioritat entre la cartera de projectes de MR&I. El problema s'afronta com una presa de decisió multicriteri (MCDM) en la qual s'han utilitzat tres models del mètode ANP, comparant els resultats entre si: el model jeràrquic basat en el Procés Analític Jeràrquic (AHP) , el procés analític en xarxa amb una subxarxa de costos i una altra de beneficis (ANP-BC), i el procés analític en xarxa amb quatre subxarxes: beneficis, oportunitats, costos i riscos (ANP-BOCR).

Les principals contribucions d'aquest treball són:

- La profunda anàlisi realitzada sobre els criteris de decisió.
- S'ha dissenyat un procediment per a avaluar un conjunt molt nombrós d'actuacions alternatives.
- S'ha obtingut un procés de presa de decisions rigorós i sistemàtic que es pot generalitzar per a altres zones de gestió de la Companyia Gestora de les Infraestructures ferroviàries

El resultat permet utilitzar el pressupost en els projectes millor valorats d'acord als criteris establits pel decisor. Obtenint-se la priorització de forma transparent i documentada.

Índice

Capítulo 1	Introducción.....	19
1.1.	Antecedentes.....	19
1.2.	Objetivos y resultados.....	22
1.3.	Proceso de elaboración de tesis.....	23
1.4.	Estructura del documento de tesis.....	25
Capítulo 2	El mantenimiento de la infraestructura ferroviaria.....	27
2.1.	Introducción.....	27
2.2.	El sistema Ferroviario Español.....	29
2.3.	Fundamentos de mantenimiento Industrial.....	34
2.4.	Sistemas de mantenimiento aplicados al sector ferroviario.....	39
2.5.	Condiciones de aplicación de los proyectos en el ámbito de la infraestructura ferroviaria.....	41
2.6.	El problema de la selección proyectos de mantenimiento ferroviario.....	43

2.7. Proceso de toma de decisiones actual y sistemas de apoyo a la decisión utilizados.	51
Capítulo 3 Proceso de decisión multicriterio y el método AHP/ANP.	55
3.1. Introducción.	55
3.2. Proceso de decisión multicriterio.	60
3.3. Elementos de una decisión multicriterio.	64
3.3.1. Selección de criterios.	64
3.3.2. Selección de Pesos.	66
3.3.3. Alternativas.	67
3.4. El método AHP. Breve descripción del método AHP.	67
3.5. El método ANP.	71
3.6. Valoración de alternativas mediante “Ratings”	78
3.7. El método ANP/BOCR.	79
3.8. Evaluación multicriterio de proyectos en el ámbito ferroviario.	81
Capítulo 4 Propuesta de modelos de selección de cartera de proyectos de MR&I ferroviario basado en AHP/ANP.	85
4.1. Proceso de toma de decisiones.	85
4.2. Formulación del problema.	87
4.3. Identificación de las alternativas.	91
4.4. Identificación y agrupación de los criterios de decisión.	97
4.4.1. Identificación y agrupación de criterios según el modelo jerárquico.	98
4.4.2. Técnica de clasificación Post-Hoc. Algoritmo de las K-Medias.	118
4.4.3. Identificación y agrupación de criterios según el modelo ANP-BC.	129
4.4.4. El modelo ANP-BOCR.	133
4.5. Criterios del modelo ANP-BOCR.	135
4.5.1. CSC Criterios de seguridad en la circulación.	135
4.5.2. CSE Criterios de eficiencia en la explotación.	136
4.5.3. CET Criterios de eficiencia técnica.	137

4.5.4.	CUS Criterios de utilidad social.	139
4.5.5.	CTV Criterios de categoría de línea.....	140
4.5.6.	CMU Criterios de mejora de utilidad.....	143
4.5.7.	CMC Criterios de mejoras de Coste.	144
4.5.8.	CML Criterios de mejora de la línea.....	145
4.5.9.	CEE Criterios de eficiencia económica.	147
4.5.10.	CVP Criterios de variación de proyecto.	148
4.5.11.	CUF Criterios de uso futuro.....	150
4.6.	Agrupación de los datos.....	151
Capítulo 5 Ponderación de criterios, valoración de alternativas y priorización 153		
5.1.	Ponderación de criterios. Modelo Jerárquico (AHP).....	154
5.2.	Ponderación de criterios. Modelo ANP-BC.....	158
5.2.1.	Pesos obtenidos en el modelo ANP-BC.....	170
5.2.2.	Comparación de resultados entre AHP y ANP-BC.	171
5.3.	Ponderación de criterios con el modelo ANP-BOCR.....	174
5.3.1.	Análisis del peso de los criterios del modelo ANP-BOCR. 174	
5.4.	Ponderación de las categorías.	202
5.4.1.	Ponderación de las categorías para la jerarquía AHP y ANP-BC. 202	
5.4.2.	Ponderación de las categorías para ANP-BOCR.....	208
5.5.	Valoración de las alternativas.	209
5.5.1.	Valoración de las alternativas según modelo AHP.....	209
5.5.2.	Valoración de las alternativas según el modelo ANP-BC	211
5.6.	Análisis de las valoraciones obtenidas por los proyectos considerados en el modelo ANP-BOCR.	214
5.6.1.	Análisis de resultados del ANP-BOCR sobre el conjunto de alternativas.....	215
5.6.2.	Análisis de las valoraciones por Subredes del conjunto total de actuaciones.....	225

5.6.3. Importancia del tipo de línea y del tipo de proyecto sobre las valoraciones obtenidas.....	233
5.6.4. Conversión de los proyectos priorizados en una cartera optima. 237	
5.7. Análisis de Sensibilidad AHP.....	248
5.7.1. Análisis de sensibilidad de los criterios.....	248
5.7.2. Conclusiones del análisis de sensibilidad de la jerarquía AHP. 260	
5.8. Análisis de sensibilidad ANP-BC.....	260
5.8.1. Análisis de sensibilidad de las subredes.	262
5.8.2. Conclusiones del análisis de sensibilidad de la red ANP-BC. 263	
5.9. Análisis de sensibilidad ANP-BOCR.....	264
5.9.1. Análisis de sensibilidad de las subredes.	264
5.9.2. Conclusiones del análisis de sensibilidad de la red ANP-BOCR. 270	
Capítulo 6 Conclusiones, aportaciones y líneas de trabajo futuras....	271
6.1. Conclusiones sobre el análisis multicriterio aplicado a carteras de proyectos de mantenimiento.	271
6.2. Conclusiones sobre la selección de criterios aplicados en análisis multicriterio de mantenimiento ferroviario.	273
6.3. Conclusiones sobre el ANP-BC con categorías en análisis multicriterio de mantenimiento ferroviario.	275
6.4. Conclusiones sobre el ANP-BOCR en análisis multicriterio de mantenimiento ferroviario.	276
6.5. Resultados obtenidos de una cartera de proyectos reales.	277
6.6. Resultados obtenidos de la cartera de proyectos.....	279
6.7. Líneas de trabajo futuras.....	280
Capítulo 7 Referencias Bibliograficas.....	283

Índice de Figuras.

Figura 1 1 Proceso de elaboración de la tesis.....	25
Figura 2 1 Tipos de mantenimiento. Elaboración propia a partir de (Murty 2002).	36
Figura 3 1 Esquema del método AHP. Adaptado de (Aragonés-Beltrán et al., 2014)	70
Figura 3 2 Esquema de los pasos del modelo. adaptada de (Aragonés-Beltrán et al., 2014).....	74
Figura 4 1 Proceso de decisión.....	86
Figura 4 2 Ámbito de la Gerencia de mantenimiento de Valencia (ADIF)	89
Figura 4 3 Esquema de la jerarquía AHP	99
Figura 4 4. Subred de Costes ANP-BC.....	130
Figura 4 5 Subred de Beneficios ANP-BC.....	131
Figura 4 6 Modelo ANP-BC.....	129
Figura 4 7. Grupos de criterios considerados agrupados por subredes. Elaboración propia.....	134
Figura 5 1 Pesos acumulados de los criterios en AHP. Elaboración propia.	157
Figura 5 2 Aportación acumulada de cada criterio al total de la subred de beneficios.....	197
Figura 5 3 Aportación acumulada de cada criterio al total de la subred de oportunidades	198
Figura 5 4 Aportación acumulada de cada criterio al total de la subred de costes	198
Figura 5 5 Aportación acumulada de cada criterio al total de la subred de riesgos.....	199

Figura 5 6 Comparativa de posición en la ordenación según el modelo utilizado.....	214
Figura 5 7 Ordenación de proyectos por valoración y tipo de proyecto	216
Figura 5 8 Ordenación de proyectos por valoración y línea.....	218
Figura 5 9 Valoraciones proyectos. El color representa proyectos sobre la misma línea.....	220
Figura 5 10 Densidad de los beneficios de los proyectos y relación con la valoración total.	226
Figura 5 11 Densidad de las oportunidades de los proyectos y relación con la valoración total.....	228
Figura 5 12 Densidad de los costes de los proyectos y relación con la valoración total.	230
Figura 5 13 Densidad de los riesgos de los proyectos y relación con la valoración total.....	232
Figura 5 14 . Diagrama de cajas y barras de la densidad de las valoraciones conjuntas de cada tipo de proyecto.	234
Figura 5 15 Diagrama de cajas y barras de la densidad de las valoraciones conjuntas de cada línea.....	236
Figura 5 16 Alternativas ordenadas, las alternativas eliminadas en color negro.....	242
Figura 5 17 Valoración de los proyectos por líneas, la valoración de los proyectos eliminados en color rojo.....	243
Figura 5 18 Valoración de los proyectos sobre la línea 32300, los proyectos eliminados en color negro	244
Figura 5 19 Valoración de los proyectos sobre la línea 31300, los proyectos eliminados en color negro	245
Figura 5 20 Valoración por tipo de proyecto, las valoraciones de los proyectos eliminados en color rojo. Elaboración propia.....	247
Figura 5 21 Análisis de sensibilidad del criterio CSC.C1 Reducción de pasos a nivel.	249
Figura 5 22 Análisis de sensibilidad del criterio CSC.C2 Señalización de pasos a nivel.	251
Figura 5 23 Análisis de sensibilidad del criterio CSC.C3. Mejora sistemas de ayuda a la conducción	253
Figura 5 24 Análisis de sensibilidad del criterio CSE.C6 Reducción del cantón crítico.	255
Figura 5 25 Análisis del criterio CUS.C26 Mejora comunicación entre municipios.....	257
Figura 5 26 Análisis de sensibilidad del criterio CSC.C4 Automatización de itinerarios y bloqueos.	259
Figura 5 27 Análisis de sensibilidad de la Subred de Beneficios en ANP-BC.....	262

Figura 5 28 Análisis de sensibilidad de la subred de costes en ANP-BC	263
Figura 5 29 Análisis de sensibilidad de la subred de Beneficios ANP-BOCR	266
Figura 5 30 Análisis de sensibilidad de la subred de Oportunidades ANP-BOCR	267
Figura 5 31 Análisis de sensibilidad de la subred de Costes ANP-BOCR	268
Figura 5 32 Análisis de sensibilidad de la subred de Riesgos ANP-BOCR	269

Índice de Tablas.

Tabla 2 1. Extensión de las redes de interés general, elaboración propia en base a la declaración de la red de ADIF.....	30
Tabla 2 2. Coste estimado del tiempo de viaje (€/km) en los países de la UE, a precios del 2002. elaboración propia a partir de (Breu et al., 2008)	47
Tabla 3 1. Valores de RI	69
Tabla 4 1 Acciones Tipo.....	92
Tabla 4 2 Líneas	94
Tabla 4 3 Conversión tipo de línea.	120
Tabla 4 4 Conversión velocidad máxima	121
Tabla 4 5 Conversión Tipo de carril.....	122
Tabla 4 6 Conversión Tipo de traviesa.....	122
Tabla 4 7 Conversión tipo de LAC.....	122
Tabla 4 8 Conversión tipo de bloqueo.....	123
Tabla 4 9 Conversión tipo de enclavamiento.....	123
Tabla 4 10 Conversión circuito de vía.....	124
Tabla 4 11 Agregación de clusters. Elaboración propia.....	126
Tabla 4 12 Centros de los conglomerados finales.....	128
Tabla 5 1 Pesos locales y globales de los criterios en AHP.	156
Tabla 5 2 Pesos acumulados por criterio.....	157
Tabla 5 3 Matriz de influencia en las subred de beneficios del modelo ANP-BC	161
Tabla 5 4 Matriz de influencia en la subred de Costes del modelo ANP-BC	161
Tabla 5 5 Matriz de comparación local de la subred de Beneficios del modelo ANP-BC.....	164
Tabla 5 6 Matriz de comparación local de la subred de costes del modelo ANP-BC	165
Tabla 5 7 Matriz de comparación global de la subred de Beneficios del modelo ANP-BC.....	168

Tabla 5 8 Matriz de comparación global de la subred de costes del modelo ANP-BC.....	169
Tabla 5 9 Pesos de los criterios en la subred de Beneficios del modelo ANP-BC	170
Tabla 5 10 Pesos de los criterios en la subred de Costes del modelo ANP-BC.....	171
Tabla 5 11 Pesos de los criterios en AHP y ANP-BC.....	173
Tabla 5 12 Matriz de influencia de la subred de beneficios del modelo ANP-BOCR	176
Tabla 5 13 Matriz de influencia de la subred de Oportunidades del modelo ANP-BOCR	177
Tabla 5 14 Matriz de influencia de la subred de Costes del modelo ANP-BOCR.....	178
Tabla 5 15 Matriz de influencia de la subred de Riesgos del modelo ANP-BOCR.....	179
Tabla 5 16 Matriz de pesos locales de la subred de beneficios del ANP-BOCR.....	181
Tabla 5 17 Matriz de pesos locales de la subred de Oportunidades del ANP-BOCR	183
Tabla 5 18 Matriz de pesos locales de la subred de Costes del ANP-BOCR	184
Tabla 5 19 Matriz de pesos locales de la subred de Riesgos del ANP-BOCR.....	185
Tabla 5 20 Matriz de pesos globales de la subred de beneficios del ANP-BOCR.....	187
Tabla 5 21 Matriz de pesos globales de la subred de Oportunidades del ANP-BOCR	188
Tabla 5 22 Matriz de pesos globales de la subred de Costes del ANP-BOCR.....	189
Tabla 5 23 Matriz de pesos globales de la subred de Riesgos del ANP-BOCR.....	190
Tabla 5 24 Pesos de los criterios de la subred de Beneficios del ANP-BOCR.....	192
Tabla 5 25 Pesos de los criterios de la subred de Oportunidades del ANP-BOCR.....	194
Tabla 5 26 Pesos de los criterios de la subred de Costes del ANP-BOCR	195
Tabla 5 27 Pesos de los criterios de la subred de Riesgos del ANP-BOCR	196
Tabla 5 28 Valoración de las categorías utilizadas en el modelo AHP.....	205
Tabla 5 29 Valoración de las nuevas categorías empleadas en el modelo ANP-BOCR	209

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

Tabla 5 30 Valoración de las alternativas según AHP. Ordenadas.....	210
Tabla 5 31 Valoración de las alternativas según ANP-BC. Ordenadas ...	211
Tabla 5 32 Comparación entre valoraciones y ordenaciones según modelos AHP y ANP-BC.....	213
Tabla 5 33 Valoración de las alternativas significativas según ANP-BOCR	215
Tabla 5 34 Listado de los 10 proyectos con mejor valoración global.....	221
Tabla 5 35 Listado de 10 proyectos con valoración global intermedia.	223
Tabla 5 36 Listado de los 10 proyectos con peor valoración global.	224
Tabla 5 37 Proyectos eliminados del listado general	241
Tabla 5 38 Valoración de las alternativas en cada Subred.....	261
Tabla 5 39 Valoración de las alternativas según cada subred en ANP-BOCR.....	265

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

Acrónimos utilizados en el texto:

ADIF: Administrador de infraestructuras ferroviarias.

AHP: Analytic Hierarchy Process. Proceso analítico jerárquico.

ANP: Analytic network process. Proceso analítico en red.

ASFA: Anuncio de Señal y frenado automático. Sistema puntual de protección de tren usado en las líneas de ADIF.

AT: Analysis team. Equipo de análisis para toma de decisiones multicriterio.

AVE: alta velocidad española. Nombre comercial de los servicios ferroviarios de larga distancia de RENFE, por extensión se usa para la infraestructura.

BAB: Bloqueo automático banalizado. Sistema de señalización ferroviario en el que se puede circular en ambos sentidos por cualquier vía.

BAD: Bloqueo automático en vía doble. Sistema de señalización ferroviario para doble vía en el que cada vía tiene un sentido de circulación preferente.

BAU: Bloqueo automático en vía única. Sistema de señalización ferroviario para vía única.

BLAU. Bloqueo de liberación automática en vía única. Sistema de señalización ferroviario para vía única donde no se supervisa la presencia del tren en todo el cantón, solo en las entradas y salidas.

BOCR: Benefits, Opportunities, Costs and Risks. Beneficios, oportunidades, costes y riesgos.

BSL: Bloqueo señalización lateral. Sistema de señalización ferroviario para vía doble utilizado en las líneas de alta velocidad. Similar al BAB pero con funcionalidades diferentes.

BT: Bloqueo telefónico. Sistema de gestión de la circulación ferroviaria en el que la autorización de movimiento al tren se da por medio telefónico.

CBA: Cost-Benefit analysis. Análisis coste Beneficio.

CBTC: Communications based Train control. Sistema de protección automática de tren digital utilizado en las explotaciones de metro, tecnológicamente similar al ERTMS.

CdV: circuito de vía. sistema de detección de la presencia de tren en la vía.

CENELEC: Comité Européen de Normalisation Electrotechnique, Comité Europeo de Normalización Electrotécnica.

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

CR160: Denominación de una tecnología de línea aérea de contacto para ferrocarriles diseñada por RENFE para velocidades de hasta 160 km/h.

CR220: Denominación de una tecnología de línea aérea de contacto para ferrocarriles diseñada por RENFE para velocidades de hasta 220 km/h.

DM: Decision maker. Decisor.

ELECTRE. ELimination Et Choix Traduisant la REalité, eliminación y elección para expresar la realidad. Método de decisión multicriterio.

ERTMS: European Railway Traffic Management System. Sistema europeo de gestión del tráfico ferroviario. Sistema de protección automática de tren para líneas de alta velocidad utilizado por ADIF y RENFE y otras administraciones europeas.

FEVE: Ferrocarriles españoles de vía estrecha.

FFCC: Ferrocarriles.

GDSS: Group Decision Support System. Sistema de apoyo a la decisión en grupo.

MAMCA: Multi actor, Multi criteria analysis. Analisis multicriterio multiactor.

MAUT: Multi-attribute utility theory, Teoría de la utilidad multiatributo.

MCDA: Multi criteria decision analysis. Análisis de la decisión multicriterio.

MCDM: Multi criteria decision making. Toma de decisiones multicriterio.

MDT: Mean down time. Tiempo medio fuera de servicio.

MR&I: Maintenance, renewal and improvement. Mantenimiento, rehabilitación y mejora.

MTBF: Mean time between failures. Tiempo medio entre fallos.

MTTR: mean time to repair. Tiempo medio hasta reparación.

MTTR: mean time to recovery. Tiempo medio fuera de servicio desde el fallo.

NAFA: Nuevo acceso ferroviario a Andalucía. Proyecto que se convirtió en la línea de alta velocidad Madrid-Sevilla.

NCB: National competence baseline. Bases para la competencia (IPMA)

PaN: Paso a nivel.

PIB: Producto interior bruto.

PMBok: Project Management Body of Knowledge, Fundamentos de Gestión de Proyectos (PMI)

PROACT: Problem, Objectives, Alternatives, Consequences, Tradeoffs. Problema, objetivos, alternativas, consecuencias y transacciones. Método de decisión multicriterio.

PROMETHEE: Preference Ranking Organization METHod for Enrichment of Evaluations. Metodo multicriterio de ordenación por superación.

RCM: Reliability centered maintenance. Mantenimiento centrado en la fiabilidad.

RENFE: Antiguamente Red nacional de ferrocarriles. Empresa operadora de transporte ferroviario.

RS: Tipo de traviesa ferroviaria de hormigón bloque y con riostra de acero.

TOPSIS: Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution. Técnica para el orden de preferencia por similitud a la solución ideal. Un método de decisión multicriterio.

UE: Unión Europea.

UIC: Union Internationale des Chemins de Fer, Unión internacional de ferrocarriles. Junto con un número designa perfiles de carril del estándar internacional, 42,5-45-54-60 y otros.

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

Capítulo 1

Introducción.

1.1. Antecedentes.

La construcción de infraestructuras ferroviarias requiere de grandes inversiones, largos plazos de planificación, ejecución y ciclos de vida. Una vez construidas, sus características (el radio de curva, tipo de plataforma, dimensiones de los túneles, diseño de vía, etc...) son difícilmente modificables. La utilidad de estas instalaciones está además, vinculada a su conexión al resto de la red. (Lopez-pita, 2006)

Dentro de los proyectos que se realizan en este tipo de infraestructuras, una parte muy importante son las actuaciones sobre líneas en servicio, que se denominan actuaciones de mantenimiento, rehabilitación y mejora (MR&I por sus siglas en ingles de Maintenance, Renewal and Improvement). Estas actuaciones son esenciales para mantener las infraestructuras ferroviarias en buen estado y para adaptarlas a los cambios en el entorno, nuevas condiciones de operación o nuevas

necesidades. La asignación eficaz de los escasos recursos disponibles para MR&I por parte de los gestores de infraestructuras es clave para el desempeño general de la red.

Las actuaciones de MR&I tienen un gran efecto a corto plazo al afectar al rendimiento de instalaciones que ya están en servicio en el momento de la actuación (Durango-Cohen & Madanat, 2008). (Loizides & Tsionas, 2002) demuestran que la obsolescencia y la falta de un mantenimiento y una reparación adecuados afectan a la productividad y llevan a un incremento de costes a largo plazo.

Cada año los gestores de una zona de la red se enfrenta con diferentes necesidades de mantenimiento, rehabilitación y mejora de la red. Estas necesidades se materializan en proyectos que hay que ejecutar con diferentes niveles de urgencia, diferentes niveles de inversión y diferentes impactos sobre la red ferroviaria. El gestor, por tanto, tiene una cartera de proyectos de MR&I y un presupuesto limitado para ejecutarlos. El problema al que se enfrenta es seleccionar qué proyectos tienen prioridad a la hora de su ejecución y qué criterios ha de considerar para establecer esa prioridad. Es un problema complejo debido al amplio número de proyectos posibles y de criterios a considerar.

Los métodos clásicos más utilizados para el análisis de proyectos de infraestructuras ferroviarias se basan en el enfoque de análisis coste-beneficio (siglas en inglés CBA), (Econom & Transporte, n.d.), (Mendoza, Cruz, & Méndez, 2006), pero existen grandes variaciones de unos autores a otros a la hora de obtener los valores económicos. Los resultados del análisis dependen mucho de la metodología específica adoptada, no siendo por ello métodos neutros ni transparentes en sus hipótesis de partida (Olsson, Økland, & Halvorsen, 2012).

Tanto (Damart & Roy, 2009) como (Flyvbjerg, 2009) consideran que el CBA no recoge toda la complejidad del problema, por lo que recomiendan pasar a enfoques multicriterio así como utilizar métodos de valoración y estimación diferentes, basados en la comparación con proyectos previos y en explicitar los supuestos del CBA. Los métodos basados en el Análisis Multicriterio de Decisiones (Multiple Criteria Decision Analysis MCDA) permiten integrar valoraciones cuantitativas y cualitativas, agregar las preferencias de varios expertos y, en general, obtener ordenaciones de proyectos más robustas que el CBA.

Pese al importante volumen económico invertido anualmente a nivel mundial en el mantenimiento de instalaciones ferroviarias y en la realización de proyectos de mejora sobre ellas, la evidencia de aplicación de las técnicas multicriterio más avanzadas en el apoyo a la toma de decisiones es muy reducido en este ámbito. El caso de la selección de proyectos en infraestructuras ferroviarias, es un problema complejo de toma de decisión que cumple todos los condicionantes para ser estudiado con técnicas de decisión multicriterio discretas por: ser limitado el número de alternativas a evaluar, mezclarse características cuantitativas y cualitativas y por existir diversas formas de evaluar el resultado obtenido. El uso de estas técnicas también permite documentar el proceso de selección de los proyectos que se ejecuten.

Por todas estas razones, en el presente trabajo se va a realizar una investigación sobre el proceso de toma de decisiones para la selección de proyectos de MR&I en una red ferroviaria. Con esta tesis, se pretende dotar a los técnicos responsables y a los gestores del mantenimiento de los administradores ferroviarios de una herramienta metodológica que les ayude a establecer una prioridad dentro de la cartera de proyectos de MR&I. El problema se afronta como una toma de decisión multicriterio (MCDM) en la que se utilizaran tanto el método Proceso Analítico en Red (ANP, Analytic Network Process) (Saaty, 2001), como su modelo inicial, el Proceso Analítico Jerárquico (AHP), propuesto por el Profesor Thomas Saaty de la Universidad de Pittsburgh en 1980 (Saaty, 2013) para ayudar al gestor a priorizar los proyectos de MR&I.

Mediante la aplicación de este método se realizará un profundo análisis de los criterios que se deben tener en cuenta para seleccionar la cartera de proyectos de MR&I y el modo de evaluar cada uno de ellos respecto a los criterios establecidos. De este modo se podrá establecer un proceso riguroso, sistemático y trazable que permita decidir qué proyectos deben ser realizados con mayor prioridad.

1.2. Objetivos y resultados.

Por todo lo expuesto en el apartado anterior, las preguntas fundamentales que se plantean en este trabajo son:

- ¿Qué actuaciones de MR&I se pueden realizar sobre una determinada infraestructura ferroviaria?
- ¿Qué efectos tienen estas actuaciones sobre la infraestructura?
- ¿Cómo establecer una prioridad entre todas las actuaciones de MR&I planteadas?

A la hora de establecer una prioridad entre los proyectos de MR&I ferroviarios en una determinada zona, surgen las siguientes preguntas específicas:

- ¿Qué criterios hay que tener en cuenta?
- ¿Cuál es su importancia?
- ¿Qué personas o actores pueden o deben participar en su identificación y análisis?
- ¿Cómo se evalúa cada proyecto respecto a cada criterio?
- ¿Cómo afectan a los resultados los posibles cambios en las ponderaciones de los criterios?
- Y finalmente ¿Qué grado de mejora produce la aplicación de la técnica ANP en el proceso de toma de decisiones, desde el punto de vista de los gestores de la zona?

La Hipótesis de partida de esta tesis es: *“El uso de una herramienta basada en técnicas de Análisis Multicriterio de Decisiones mejora el proceso actual de toma de decisiones en la priorización de proyectos de MR&I de infraestructuras ferroviarias”*.

El objetivo general del presente trabajo de investigación es: *contribuir a la mejora del proceso de toma de decisiones para establecer una prioridad entre los proyectos de MR&I propuestos en una zona de la red ferroviaria convencional, mediante la aplicación del Proceso Analítico Jerárquico (AHP) y el Proceso Analítico en Red (ANP)*.

Los objetivos específicos necesarios para alcanzar el objetivo final son:

- Proponer un método sistemático para identificar los proyectos de MR&I de una determinada infraestructura ferroviaria, constituyendo así la cartera de proyectos de MR&I.
- Identificar y analizar qué criterios se tienen que considerar para establecer una prioridad entre los proyectos de MR&I, teniendo en cuenta la literatura científica y la experiencia de los gestores.
- Desarrollar un modelo multicriterio de toma de decisiones, basado en el método ANP que permita priorizar la cartera de proyectos en base a los criterios identificados.

No se pretende realizar ninguna aportación novedosa a la teoría de decisión multicriterio, sino extender el uso de una técnica conocida a un nuevo ámbito con una problemática específica no encontrada en la literatura existente, desarrollándose un estudio pormenorizado de los criterios importantes y cómo valorarlos. Como se justificará en el Capítulo 3 de esta tesis, las razones fundamentales para usar AHP/ANP han sido: i) se afronta un problema de decisión multicriterio, ii) permite integrar en el modelo, tanto criterios cuantitativos como cualitativos, iii) se perciben dependencias entre los elementos del problema, iv) el método obliga al decisor a realizar una profunda reflexión sobre el problema de una manera estructurada y rigurosa.

AHP y ANP se han usado en el campo de la gestión de infraestructuras como la selección de rutas para un gasoducto (Thomaidis & Mavarakis, 2006), selección de una cartera de proyectos en una empresa eléctrica (Smith-Perera, García-Melón, Poveda-Bautista, & Pastor-Ferrando, 2010), selección de un puente en condiciones de incertidumbre (Gervásio & Simões da Silva, 2012), selección de grandes proyectos internacionales de ferrocarril (Tsamboulas, 2007), selección de rutas urbanas de tranvía (Gerçek, Karpak, & Kiliñaslan, 2004), selección entre variantes de ejecución de proyectos ferroviarios internacionales (Ambrasaitė, Barfod, & Salling, 2011). De forma indirecta se ha utilizado evaluación multicriterio en ferrocarriles para análisis de mantenimiento mediante RCM (Carretero et al., 2003)

1.3. Proceso de elaboración de tesis.

El método de investigación que se va a seguir en esta tesis para lograr los objetivos es el método del caso, con entrevistas y cuestionarios a expertos, estudiando un caso específico en profundidad como recomienda

(Flyvbjerg, 2004). En este caso, dado que la Red Ferroviaria española está dividida en zonas, el caso de estudio se ha centrado en la Zona de Levante, siendo los expertos el gerente de mantenimiento y uno de los técnicos de su equipo (autor de esta tesis).

El proceso seguido en la elaboración de esta tesis ha tenido las siguientes etapas (ver Figura 1 1):

- Revisión bibliográfica y estado del arte. En esta fase se ha estudiado el estado del arte de la gestión de proyectos en el campo de las grandes infraestructuras, centrándonos en las infraestructuras de transporte, especialmente ferroviarias y en los sistemas de gestión de mantenimiento y actuaciones de MR&I.
- Técnicas de análisis y apoyo a la decisión multicriterio. Estudio de las técnicas multicriterio y de su aplicación al problema planteado, basándonos en experiencias previas en campos comparables.
- Revisión de bibliografía y experiencias previas de criterios considerados en análisis de infraestructuras ferroviarias. Búsqueda y selección de los criterios que puedan tener influencia en el proceso de toma de decisiones.
- Generación de un modelo inicial básico de AHP. Agrupación de los criterios considerados relevantes, relacionándolos entre sí, para generar un modelo básico AHP exploratorio como primera etapa de validación.
- Transformación del modelo AHP en un modelo ANP-BOCR, para explorar el efecto sobre los pesos y las valoraciones que tienen las relaciones entre criterios.
- Desarrollo del modelo ANP-BOCR. Creación de un nuevo modelo ANP-BOCR que supera las limitaciones encontradas en los modelos exploratorios previos y agrupa los criterios considerados relevantes y explicativos, transformando la propuesta inicial en un modelo maduro. Aplicación del modelo a un caso real con una cartera muy amplia de proyectos.
- Análisis del modelo ANP-BOCR y de los resultados obtenidos. Análisis del modelo y de los criterios. Estudio de la ordenación alcanzada y desarrollo de conclusiones basadas en ella. También se han estudiado las incompatibilidades dentro de la cartera generada para obtener una cartera eficaz.

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.



Figura 1 1 Proceso de elaboración de la tesis.

1.4. Estructura del documento de tesis.

Los siguientes capítulos del documento se han organizado de la siguiente forma:

En el Capítulo 2 se hace una introducción al campo del mantenimiento de la infraestructura ferroviaria, incluyendo las condiciones específicas de España y del Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (ADIF) y el problema de selección de carteras de proyectos. En este apartado también se incluye una revisión del estado del arte de los sistemas de evaluación de proyectos empleados por las administraciones ferroviarias.

A continuación, en el Capítulo 3 se hace un análisis de los sistemas de decisión multicriterio existentes, refiriéndonos específicamente al sistema

AHP/ANP que se ha utilizado en este trabajo y su aplicación a la selección de carteras de proyectos en el ámbito ferroviario.

En el Capítulo 4 se presenta la evolución de los modelos elaborados, un primer modelo jerárquico (AHP) y dos modelos en red, uno basado en Beneficios y Costes y otro más complejo basado en Beneficios, Oportunidades, Costes y Riesgos (BOCR). Estos modelos se aplican a la selección de una cartera de proyectos por el responsable de la Zona de Levante de ADIF.

El capítulo 5, recoge el análisis de sensibilidad y los resultados obtenidos

Finalmente el capítulo 6 refleja las conclusiones generales de la tesis, incluyendo posibles desarrollos futuros del trabajo realizado.

Capítulo 2

El mantenimiento de la infraestructura ferroviaria.

2.1. Introducción.

El ferrocarril es un sistema de transporte guiado intensivo en capital y que requiere de grandes inversiones para su ejecución. Como se indica en (de Rus, Barron, & Campos, 2009) los tiempos de amortización son muy largos, principalmente en infraestructura (puentes, túneles, etc..) y estos costes son irrecuperables una vez realizados. (Short & Kopp, 2005) estiman que la inversión media en infraestructuras de transporte en países de la UE es del 1% del PIB, representando el ferrocarril una parte importante, el 0,4% del PIB en los últimos años, según datos de la agencia europea del medio ambiente ((EEA), 2014). Una vez realizada la inversión en este tipo de infraestructura, las modificaciones y mejoras son también muy intensivas en capital. Por tanto, las decisiones adoptadas tienen impactos significativos durante décadas (Short & Kopp, 2005). En EEUU el sector del ferrocarril ya dedicaba en 1985 entre el 17 y el 19 % de sus gastos de operación al mantenimiento de la infraestructura, (Koot

& TYWORTH, 1985) por lo que podemos deducir que el correcto diseño inicial y una ejecución adecuada de la infraestructura tienen repercusión en el desempeño a largo plazo.

El estudio de las inversiones en infraestructuras del transporte, es una rama de la ingeniería que se dedica a la aplicación de la ciencia y la tecnología a la planificación, diseño, operación y gestión, de las instalaciones de cualquier modo de transporte, para conseguir un movimiento de personas y bienes lo más rápido, seguro, cómodo, económico, eficaz y ecológico posible (Sussman, 2000). A nivel europeo (UE-15) el sector del transporte representa el 5% del PIB, (E. Commission, 2011) y el ferrocarril se utiliza para el 16% del transporte de mercancías y para el 7% del transporte de pasajeros,

Desde el punto de vista de la utilidad, un sistema de transporte cumple la función de conseguir que las personas puedan realizar las actividades que consideren en el lugar y momento deseado (Arentze et al., 2003). Habitualmente se ha considerado que la demanda de transporte es derivada de la demanda de la actividad económica general siendo un coste que se debe minimizar, básicamente con la reducción del coste y del tiempo de viaje (Breu, Guggenbichler, & Wollmann, 2008). Otros parámetros que afectan a la utilidad de un sistema de transporte son, por ejemplo, los definidos por (Salling & Banister, 2009) y (Bigotte, Krass, Antunes, & Berman, 2010), que investigan la importancia de la accesibilidad a los medios de transporte para el cambio de modo. Es importante indicar que en viajes de corta distancia, dentro del núcleo urbano o metropolitano, el tiempo de viaje medio se ha mantenido constante en el tiempo, pero la distancia ha aumentado, al aumentar el tamaño de las ciudades, el uso del vehículo privado y los sistemas de transporte público eficaces (Schwanen & Dijst, 2002).

El sistema de transporte de una región tiene varios componentes, que se influyen entre sí. La realización de inversiones en infraestructuras ferroviarias tiene efectos sobre el reparto modal entre el ferrocarril y el avión. (Adler, Pels, & Nash, 2010) han estudiado este efecto a nivel europeo, con técnicas de teoría de juegos, para concluir que el desarrollo de una red ferroviaria transeuropea de alta velocidad reduciría la demanda de transporte aéreo intraeuropeo, maximizando el beneficio social y medioambiental. (Jiménez & Betancor, 2012) han estimado que la entrada en servicio de una línea ferroviaria de alta velocidad disminuye de media un 17% la demanda de transporte aéreo en ese mismo corredor.

Las demandas realizadas a las infraestructuras de transporte ferroviario cambian con el tiempo, en parte debido a cambios en las necesidades de los usuarios y en parte por la degradación de las instalaciones con el uso. Por ello se hace necesaria la realización de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora para ajustar las infraestructuras a las nuevas necesidades y mantener la calidad de servicio prevista.

En general, el análisis de la decisión adoptada por los usuarios a la hora de utilizar uno u otro método de transporte, la modelización de esa relación y cómo se ve afectada por los cambios en los modos de transporte ha sido ampliamente estudiada, principalmente con métodos probabilísticos como el modelo Logit. Se pueden ver amplias reseñas en (Arentze et al., 2003), (Ding-Zhu, 2009) o en (Bazzan, 2009).

2.2. El sistema Ferroviario Español.

La red ferroviaria española es de reducida extensión en comparación con el tamaño del país, 26 km/km² frente a la media de la UE de 56 km/km². En parte, debido a la falta de desarrollo del ferrocarril en España durante gran parte del siglo XX (García Álvarez, 2010), y en parte, a la relativa baja densidad del país (la densidad de población de España es de 90,70 hab/km² en 2010, frente a la media de la UE de 119,00 hab/km²), existiendo zonas con densidades de población muy bajas, que no justifican la creación de una infraestructura como el ferrocarril, óptima para movimientos de grandes cantidades de viajeros hasta distancias medias, hasta 500-600 km. Como se indica en (Seabright, 2003) el ferrocarril tiene grandes economías de escala y de densidad que lo aconsejan para corredores y servicios de alta demanda.

La red de interés general (propiedad del estado español) se compone de tres redes complementarias, una en ancho internacional (ancho UIC, 1435 mm), otra en ancho nacional (1667 mm) y una tercera parte en ancho métrico, procedente de los extintos Ferrocarriles de Vía Estrecha (FEVE). La extensión de las redes en 2012 se puede ver en la Tabla 2 1.

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

Red de Ancho internacional	2.322 km
Red de Ancho nacional	11.680 km
Red de Ancho métrico	1.211 km
Total Red de interés general	15.333 km

Tabla 2.1. Extensión de las redes de interés general, elaboración propia en base a la declaración de la red de ADIF.

La red de ancho nacional, también conocida como convencional, tiene su origen en las líneas ferroviarias que construyeron diferentes compañías ferroviarias en el siglo XIX. El primer tramo en territorio peninsular fue el Barcelona-Mataró del año 1848. La red se fue construyendo durante el siglo XIX y la primera parte del XX, principalmente en vía única y posteriormente se fue ampliando con duplicaciones de vía y electrificaciones, durante el siglo XX. Al finalizar el año 1899 la red tenía ya 10.957 km, el 79,8% del máximo, con un crecimiento muy reducido desde entonces, (García Alvarez, 2010).

La red de ancho internacional nació cuando se puso en servicio en el año 1992 el nuevo acceso ferroviario a Andalucía (NAFA), una línea independiente para uso exclusivo de viajeros entre Madrid y Sevilla con parámetros de alta velocidad. Desde entonces ha ido creciendo al generarse nuevas líneas independientes. Los últimos tramos puestos en servicio han sido Madrid-Valencia en 2010 y el Madrid-Alicante y Barcelona-Figueras en 2013. Hasta el momento, la red de ancho internacional realiza fundamentalmente servicios de pasajeros. En los tramos puestos en servicio entre Barcelona y la frontera francesa se han comenzado a explotar de forma marginal servicios de mercancías.

En España, los operadores ferroviarios son independientes de los gestores de la infraestructura, aunque pertenezcan al mismo grupo empresarial, debido a la directiva 2001/12/CE de la UE, que exige la separación, como mínimo contable, entre los operadores de la red y los gestores de la infraestructura.

Por aplicación de la directiva 2001/12/CE de la UE, en el año 2005, RENFE se divide en dos empresas, ADIF y RENFE, siendo la primera la encargada de la infraestructura y la segunda del material móvil y de las operaciones de transporte.

Desde el año 2003 el transporte de mercancías por ferrocarril está liberalizado y existen 6 compañías que operan en España servicios de mercancías. Está prevista la apertura a la competencia del sector del

transporte de pasajeros, pero hasta el momento, el Gobierno todavía no ha tomado una decisión al respecto. En el año 2013 ADIF integró la división de infraestructura de FEVE (Ferrocarriles españoles de vía estrecha) haciéndose cargo de toda la red ferroviaria propiedad del estado.

La compañía que gestiona la red ferroviaria de interés general en España es ADIF (Administrador de infraestructuras ferroviarias), una compañía pública dependiente del Ministerio de Fomento. La relación entre ambas entidades se basa en un contrato programa, que define las tareas a realizar por ADIF sobre la red ferroviaria (propiedad del estado) y el nivel de calidad exigido por el Ministerio. En el contrato programa, (ADIF, 2007) también se fijan las líneas generales de mejora de las instalaciones durante su vigencia.

Las instalaciones en la red convencional tienen una antigüedad media elevada, aunque ha habido renovaciones importantes en los últimos años, sobre todo en los tramos más congestionados y utilizados. La mayor parte de las instalaciones más antiguas están en tramos de baja utilización y de bajo nivel de prestaciones exigidas. Los niveles de prestaciones necesarios son bastante heterogéneos, ya que existen desde instalaciones con tráficos de cercanías, con trenes cada 2-3 minutos, instalaciones de uso menos intensivo y una parte importante de la red con menos de 5 trenes al día. La migración hacia tecnologías más modernas es compleja y lenta por la gran extensión territorial de la red, el número de instalaciones existentes y el elevado coste unitario de los sistemas.

Categorías por circulaciones	Muy alta	Alta	Media	Baja	Muy baja	Nula
Circulaciones medias semanales	> 1.500	1.500-801	800-301	300-100	1-100	0
km	225	502	3.698	4.593	4.463	461
% km	1,6%	3,6%	27,4%	34%	33%	3,3%

Tabla 2 Uso de la red ferroviaria. Elaboración propia en base a Cirtra 2011 de ADIF. (2012)

Como se puede ver en la Tabla 2 , la mayor parte de la red tiene un nivel de uso reducido y partes muy importantes de ella tienen un uso marginal, menos de 300 circulaciones a la semana.

El Estado español, a través del Ministerio de Fomento, le encarga tres funciones fundamentales a ADIF: la construcción de nuevas líneas o variantes, la explotación de la red y el mantenimiento de la misma.

Gran parte de las características de la red ferroviaria están fijadas por el diseño inicial y su cambio implica grandes costes económicos. (de Rus et al., 2009) realizan un estudio para las redes de Alta Velocidad, en el que destacan que la planificación inicial de la red, en cuanto a modelo de explotación y diseño (pendientes, viaductos y túneles, radios, etc.), marca profundamente las posibilidades de uso y limita el ámbito de actuación, pero dentro de esas limitaciones fundamentales hay un rango de variaciones importante. (Flyvbjerg, Holm, & Buhl, 2003) documentan que las desviaciones entre los costes reales y los proyectados se mantienen constantes en el tiempo desde hace décadas, por lo que no se esperan mejoras importantes en los costes por mejoras de productividad ni en la calidad de las previsiones realizadas al realizar los proyectos, si no hay cambios en los sistemas de gestión de proyectos utilizados.

Por todo lo expuesto queda claro que cualquier cambio en la metodología que mejore la forma de considerar todas las variables que afectan al proyecto y reduzca las incertidumbres existentes en los resultados y costes va a representar una mejora importante con respecto a la situación actual.

Por la antigüedad media de la red y la existencia de tecnologías heterogéneas, la función mantenimiento es bastante compleja y requiere de personal y tecnologías muy específicas. Para mantener los niveles de seguridad y servicio demandados en el contrato programa, es esencial realizar un buen mantenimiento de la infraestructura.

El coste de mantenimiento de las infraestructuras ferroviarias es alto. Sin embargo, una adecuada gestión del mismo es fundamental para reducir su coste y mantener o mejorar los niveles de servicio requeridos. Una correcta gestión del mantenimiento en infraestructuras maduras y cercanas al final de su vida útil, como es el caso de la red convencional de ADIF, es fundamental, como explican (Durango-Cohen & Madanat, 2008)

El contrato-programa de ADIF con el ministerio de Fomento especifica que ADIF se encarga del mantenimiento y la explotación por unos

ingresos fijos, por lo que es necesario minimizar el coste de la función mantenimiento y su repercusión sobre el desempeño de la red. A efectos técnicos ADIF tiene plena libertad para realizar acciones de mantenimiento sobre la infraestructura, a su propio coste, de ahí la necesidad de seleccionar las mejores actuaciones.

No toda la red requiere del mismo nivel de calidad de servicio, tampoco los niveles de mantenimiento necesarios son uniformes, sino que se adaptan para conseguir el mínimo coste y minimizar la repercusión sobre las circulaciones (ADIF, 2013).

Dentro de los elementos a mantener se distinguen dos grupos fundamentales:

- Elementos consumibles: Parte de los elementos de infraestructura de la red que se ven afectados por el uso, desgastándose y siendo necesario su acondicionamiento o sustitución periódica, en función del tiempo o del uso que se les dé.
- Elementos no consumibles: Estos elementos requieren de trabajos de mantenimiento para evitar su degradación, sin estar vinculados fundamentalmente al uso de la instalación y sin necesidad de su sustitución periódica. El caso más importante son los puentes y túneles.

Las acciones que se realicen pueden devolver los elementos a su estado original o mejorarlos, de manera que esto suponga un beneficio para la red en la que se encuentra el elemento a mantener. La correcta selección de estas actuaciones de mejora permite que, de forma gradual, se vayan mejorando las prestaciones de las instalaciones con el propio proceso de mantenimiento.

ADIF tiene libertad para realizar modificaciones menores sobre la red, pero cualquier actuación importante ha de ser aprobada por el Ministerio de Fomento. Resulta interesante pues, el uso de un sistema de ayuda a la decisión multicriterio que permita presentarle al Ministerio un conjunto de proyectos a realizar priorizados en función de la mejora en el desempeño de la instalación desde varios puntos de vista, con criterios claros y explícitos, puesto que es la parte interesada fundamental para autorizar la ejecución del proyecto.

A nivel del departamento de ADIF, responsable del mantenimiento y explotación, los objetivos generales a considerar son los siguientes, obtenidos del contrato programa 2007-2010 y de la misión y visión de la Dirección de operaciones de Red Convencional de ADIF:

- Mejora de la capacidad en las zonas saturadas.
- Reducción del número e importancia de las incidencias debidas a la infraestructura.
- Reducción de los costes de mantenimiento y explotación de la red.

El tipo de inversiones considerado en este trabajo no es la creación de nuevas líneas o la realización de cambios que requieran de la participación de los operadores ferroviarios. El trabajo se va a centrar en los cambios en los que, sólo con la actuación propiamente estudiada, se obtienen mejoras en los criterios generales anteriores.

Los proyectos o actuaciones que requieran para su éxito de la participación principal y directa de elementos ajenos a los departamentos de mantenimiento de la empresa ferroviaria no se consideran puesto que se escapan del alcance de la toma de decisiones que se va a considerar en el caso de estudio.

2.3. Fundamentos de mantenimiento Industrial.

El mantenimiento se puede definir como las decisiones de ingeniería y acciones asociadas necesarias y suficientes para optimizar la capacidad de un equipo o instalación, siendo la capacidad la habilidad de desarrollar una función dentro un rango de desempeño definido, (Muchiri, Pintelon, Gelders, & Martin, 2011). La European Federation of National Maintenance Societies lo define como "El conjunto de acciones que permiten mantener o reestablecer un bien a un estado especificado o en capacidad de asegurar un servicio determinado", (Societies, n.d.). Según esta Asociación, la función mantenimiento cubre el conjunto de actividades que deben existir sobre una instalación para obtener un coste global de mantenimiento mínimo durante la vida prevista de la instalación.

(Crespo & Gupta, 2006) han definido el mantenimiento como la combinación de acciones técnicas, administrativas y de gestión durante el ciclo de vida de un elemento que permitan o devuelvan el elemento a un estado en el que pueda realizar su función. Estos autores proponen unas actividades que clasifican según el siguiente esquema:

1.- Gestión a largo plazo. Incluye las siguientes acciones:

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

- Definir criterios para recambios.
- Definir indicadores de mantenimiento.
- Decidir sobre subcontratación/externalización.
- Reparto de tareas sobre los equipos de mantenimiento.
- Establecer el plan de calidad del mantenimiento.
- Mejora continua de los procedimientos.
- Formación del personal de mantenimiento.

2.- Análisis técnicos a medio y largo plazo.

- Programación de intervenciones a medio plazo.
- Control del presupuesto de mantenimiento.

3.- Ejecución de acciones de mantenimiento.

- Distribución del trabajo.
- Realización de las acciones.
- Informe de los resultados de las acciones.

4.- Gestión de repuestos.

- Compra de repuestos.
- Gestión de almacén.
- Almacenamiento de repuestos.

Dentro de la gestión del mantenimiento existen varias estrategias posibles de trabajo, según el esquema de la Figura 2 1 (Murthy, 2002).

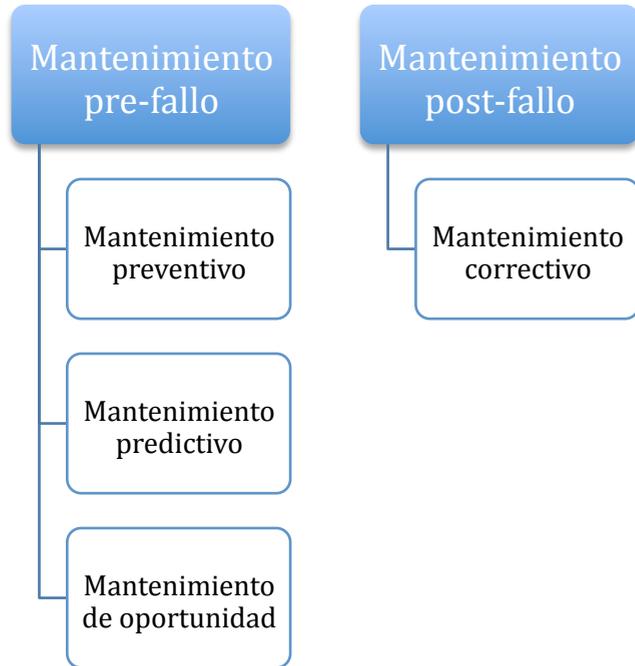


Figura 2 1 Tipos de mantenimiento. Elaboración propia a partir de (Murty 2002).

1. Mantenimiento Pre-fallo.

Se aplica prioritariamente a los componentes críticos de la producción. Los equipos seleccionados se dividen en sub-elementos que se puedan mantener. Sobre estos elementos se establecen frecuencias de reposición, basadas en análisis estadísticos de ciclos de vida y en función del coste del fallo.

- El mantenimiento preventivo se aplica principalmente a equipos cuyo coste de reposición no sea muy alto, ya que no se aprovecha al máximo la vida útil del equipo. A cambio se consigue reducir las paradas imprevistas de los equipos. Es especialmente interesante en los equipos cuya relación fallo-duración de vida es conocida, como, por ejemplo, todos los equipos sometidos a desgaste.
- El mantenimiento predictivo se aplica a los equipos cuyo coste de reemplazo sea superior y se disponen de técnicas no

destructivas para establecer la condición del equipo. Permite ajustar de forma óptima el tiempo para realizar el mantenimiento preventivo. Sus principales inconvenientes son que no se pueden monitorizar todos los parámetros significativos y se pueden dar averías no detectadas por el sistema de vigilancia y averías entre dos periodos de medida, si estos no están adecuadamente ajustados.

- El mantenimiento de oportunidad es en el que se aprovecha una parada de los equipos para realizar las operaciones de mantenimiento, realizando las reparaciones y revisiones necesarias para el nuevo periodo de utilización. Es muy habitual en fábricas y en ferrocarriles, al aprovecharse las paradas de las instalaciones por una causa para realizar renovaciones completas.

2. Mantenimiento Post-fallo.

- El mantenimiento correctivo consiste en el conjunto de acciones destinadas a solucionar o corregir un equipo con fallo o avería, con el fin de restituir su disponibilidad. Esta forma de trabajar permite no tener una gran infraestructura técnica y se aprovecha al máximo la vida útil de los equipos. En cambio los trastornos en la producción son máximos al presentarse el fallo de forma imprevista. Es la forma mas recomendada en equipos secundarios cuya avería no afecte de forma importante a la producción.

El concepto del mantenimiento ha evolucionado con el tiempo y ha cambiado en su enfoque en el tiempo. Se consideran cuatro generaciones fundamentales en la gestión del mantenimiento (Murthy, 2002).

1. Desde la revolución industrial hasta la segunda guerra mundial. Mantenimiento puramente correctivo.
2. 2º Guerra Mundial hasta los años 70. Se descubre la relación entre edad de los equipos y probabilidad de fallo. Se comienzan a realizar sustituciones preventivas. Primeras aplicaciones del mantenimiento preventivo.
3. Principios de los años 80. Se empiezan a realizar estudios causa-efecto para averiguar el origen de los problemas. Se desarrollan

las técnicas de mantenimiento predictivo. Se involucra a la producción en las tareas de detección de fallos.

4. Principios de los años 90. El mantenimiento se incluye dentro del concepto de calidad total. Mediante una adecuada gestión del mantenimiento es posible aumentar la disponibilidad y reducir los costes. La probabilidad de que una máquina falle y las consecuencias asociadas para la empresa es un riesgo que hay que gestionar, teniendo como objetivo maximizar la disponibilidad con el mínimo coste. Es lo que se denomina mantenimiento basado en el riesgo.

Las principales variables utilizadas para medir el comportamiento de un sistema de cara a mantenimiento son las siguientes.

- MTBF: Mean time between failures. Tiempo medio entre fallos de un sistema.
- MTTR: Mean time to repair. Tiempo medio de reparación de un sistema en fallo.
- MTRR: Mean time to recovery. Tiempo medio fuera de servicio desde el fallo.
- MDT: Mean down time. Tiempo medio fuera de servicio.

En mantenimiento en general (Ponchet, Fouladirad, & Grall, 2010) han estudiado la evolución de los sistemas en casos de multideterioro con varios criterios de actuación, basados en el modelo de la instalación y la medida periódica de su deterioro. Como ejemplo de modelos avanzados de gestión del mantenimiento se puede citar a (Rosqvist, Laakso, & Reunanen, 2009), que muestran la aplicación del Mantenimiento basado en valor (Value driven maintenance) en una planta de gasificación. Dentro del ámbito del transporte se han realizado estudios de aplicación de las metodologías más avanzadas, (Seyedshohadaie, Damjanovic, & Butenko, 2010) usan un proceso de decisiones basado cadenas de Markov para optimizar las acciones de mantenimiento (mantenimiento y rehabilitación en su caso) del pavimento de una autopista, en función del valor condicional en riesgo. (Vatn & Aven, 2010) diseñan un método de optimización costo-beneficio para diseñar un programa de mantenimiento en una instalación con implicaciones de seguridad, aplicándolo a una instalación ferroviaria, de forma que se puedan ajustar las frecuencias de las acciones de mantenimiento preventivo, teniendo en cuenta las repercusiones sobre la seguridad de la fiabilidad obtenida del elemento a mantener. (Andersson, Smith, Wikberg, & Wheat, 2012) realizan un

análisis de la necesidad de renovaciones de vía con las características del tramo y el uso de la infraestructura encontrando que la necesidad de renovación aumenta con el uso y la antigüedad de la infraestructura y disminuye en cuanto mayor calidad de la vía.

En el ámbito de las grandes infraestructuras, las funciones de mantenimiento tienen unas características especiales: debido al largo ciclo de vida, estas instalaciones, además de mantenerlas para su correcto uso, según el diseño original, hay que adaptarlas a nuevos usos o prestaciones. Ese es el caso del ferrocarril, donde una determinada línea construida, por ejemplo a finales del siglo XIX continúa en servicio pero con unas características y usos completamente diferentes a los originales. De ahí la importancia de los proyectos de MR&I, que no solo son actuaciones sobre la infraestructura para devolver las instalaciones a su nivel de resultados previsto, sino que, además, mejoran los puntos débiles. Estos puntos débiles pueden ser los iniciales desde la puesta en servicio, o los surgidos por el uso de la instalación, o por los cambios en la explotación a lo largo de la vida útil. Los cambios técnicos y de gestión a lo largo de la vida útil de la instalación, hacen necesarios estos trabajos para mantener la calidad del servicio ferroviario dentro de los márgenes esperados en cada momento.

Excepto en casos extremos o situaciones excepcionales las líneas ferroviarias no se cierran sino que se transforman, adaptando el nivel de servicio a los cambios deseados por los usuarios.

2.4. Sistemas de mantenimiento aplicados al sector ferroviario.

El mantenimiento de infraestructuras ferroviarias es uno de los costes principales de la explotación de estas, como exponen (de Rus et al., 2009), siendo uno de los factores clave para obtener un buen desempeño de la infraestructura, tanto económico como de explotación.

En otros tipos de instalaciones industriales, es posible aplicar estrategias de mantenimiento basadas en duplicar sistemas completos pero en las infraestructuras ferroviarias no es posible por el elevado coste que ello representa. Tan sólo algunos elementos muy específicos son duplicables, como las fuentes de alimentación eléctrica o los relés, no pudiendo duplicarse los elementos fundamentales, como la plataforma, los puentes y túneles o la propia vía.

En el sistema de gestión de calidad de ADIF, según el manual de gestión de la Subdirección de operaciones e Ingeniería de Red Convencional se consideran tres tipos de funciones de mantenimiento.

- **Mantenimiento preventivo.** Son las acciones de mantenimiento periódico, programado o según estado que se realizan sin que haya ninguna avería. Estas tareas se realizan principalmente sobre las partes de la infraestructura sobre las que se puede medir el desgaste y que tienen un comportamiento continuo, por ejemplo, el desgaste del carril, el hundimiento de la vía, el desgaste y la geometría de catenaria, aislamiento eléctrico de cables y otros similares.

Tanto en ADIF como en otras administraciones ferroviarias se han implantado sistemas predictivos para evaluar el estado de la infraestructura fundamental de forma que, en lugar de trabajos periódicos, el trabajo se realice según estado, reduciéndose así las actuaciones sólo a los lugares y momentos en los que sea realmente necesario y comprobándose después el nivel de calidad obtenido. Por otro lado gran parte de las averías e incidencias se deben a sistemas con dos estados posibles: operativo o no operativo. Estos sistemas son, por ejemplo, casi todos los implicados en señalización, subestaciones o telecomunicaciones. No son susceptibles de controlarse mediante una evaluación o prueba que mida el desgaste. Ante esos sistemas la única situación posible es disponer de sistemas redundantes para aumentar la disponibilidad y sistemas de supervisión remota para conocer el fallo lo antes posible y disminuir el tiempo de indisponibilidad (MTTR).

- **Mantenimiento correctivo.** Son las tareas de mantenimiento en las que ya se ha producido una avería. Uno de los objetivos de un buen mantenimiento preventivo es evitar la realización de tareas correctivas. Las actuaciones correctivas tienen como finalidad devolver el sistema a su estado operativo, previo al fallo.
- **Actuaciones de mejora.** Dentro de las funciones del departamento de mantenimiento está el promover y realizar obras y proyectos que mejoren el funcionamiento y el desempeño de la infraestructura. Estas actuaciones permiten, por un lado, devolver la infraestructura al nivel óptimo tras una avería o un proceso de desgaste prolongado y, por otro lado, aumentar el nivel de prestaciones de la infraestructura. La idea tras estas actuaciones es conseguir mejorar los parámetros de la infraestructura en las variables que limitan el desempeño.

Uno de los objetivos principales fijados en el contrato programa entre ADIF y el Ministerio de Fomento se basan en la reducción del número de

incidencias que afecten a la circulación y del número de trenes retrasados, es decir, reducir el número de averías que repercutan en las operaciones de transporte. Ambos parámetros están vinculados directamente a la calidad del mantenimiento. El primer parámetro se reduce mediante un buen mantenimiento preventivo y el segundo mediante un buen mantenimiento correctivo. El diseño previo de las instalaciones también marca el nivel de averías y la facilidad de su reparación.

El conjunto de proyectos que se va a evaluar en el caso de estudio de la presente tesis, se compone de todas las actuaciones de mejora posibles, comparando la satisfacción de los criterios para maximizar la utilidad percibida por los decisores.

Este conjunto de proyectos se compone básicamente de proyectos de renovación tecnológica y rehabilitación de las instalaciones existentes, acercando las características de las instalaciones a unas instalaciones ideales con el máximo nivel de características posibles.

Este nivel máximo de prestaciones no es siempre lo más deseable, ya que a su vez implica mayores costes de gestión, mantenimiento y explotación, así como un gasto muy elevado de construcción. La posibilidad de conseguir aplicar los recursos disponibles, escasos por definición, en donde se obtengan los mejores resultados es el objetivo último de este proceso de análisis y de gran parte de la gestión de los mantenedores, tanto del ferrocarril como de cualquier otro sistema.

2.5. Condiciones de aplicación de los proyectos en el ámbito de la infraestructura ferroviaria.

Los proyectos de MR&I (mantenimiento, rehabilitación y mejora por sus siglas en inglés) de infraestructuras, no son proyectos que destaquen por su incertidumbre técnica en cuanto a métodos o resultados directos, al basarse en tecnologías muy maduras. El elevado nivel de seguridad exigible a las infraestructuras ferroviarias y su gran vida útil, hace que sea necesario ser conservador en cuanto a especificaciones y características, utilizándose sólo equipos, técnicas y metodologías muy probadas en situaciones anteriores. Los proyectos para evaluar nuevas técnicas o materiales no se consideran dentro del conjunto de proyectos estudiados en esta tesis, por tener un trato muy diferente en cuanto a gestión y una mayor incertidumbre en los resultados. Además, requieren de un seguimiento técnico especializado diferenciado para su evaluación,

completamente diferente a los proyectos de MR&I donde el estado final de las instalaciones va a ser diferente al inicial, pero ya conocido y normalizado.

En el caso particular de la instalaciones de señalización, la norma CENELEC EN-50126, (CENELEC, 1999), de obligado cumplimiento por la Directiva de seguridad ferroviaria, (Europeo, 2004) y la Directiva sobre Interoperabilidad del sistema ferroviario, (Europeo, 2008), que define los niveles de seguridad integral (SIL) y solo permite el uso de sistemas de seguridad probados y documentados, con un control muy estricto de los riesgos, condiciones de aplicación y modificaciones. Este control tan estricto es la única manera de asegurar el nivel de seguridad en la circulación ferroviaria necesario. Por contra, este control penaliza la implantación de nuevos productos en las instalaciones de señalización hasta que demuestren el nivel de fiabilidad requerido. El sistema de gestión de la seguridad es similar al de otras industrias con condicionantes parecidos, como la nuclear o petroquímica, que tienen normas más genéricas, como la (I. E. Commission & others, 2000).

Desde el punto de vista de gestión los proyectos de MR&I de infraestructuras ferroviarias el alto coste, la implicación medioambiental, el efecto sobre la distribución modal de transportes y la dificultad de posteriores modificaciones, hace que existan múltiples niveles de control y supervisión sobre el gestor directo. Ha de haber consenso entre todos los actores para poder utilizar los recursos en un proyecto determinado.

Además de esto, hay que añadir que una infraestructura ferroviaria sólo marca las capacidades potenciales de transporte, siendo los operadores ferroviarios los que han de utilizarla de una forma adecuada. Realizar un proyecto técnicamente perfecto a un coste muy ajustado pero cuyo resultado no es aprovechable por los operadores ferroviarios es inadecuado, ya que los beneficios obtenidos son mucho más reducidos que los de un proyecto equivalente, pero aplicado donde realmente se pueda aprovechar por parte de los operadores.

Otro aspecto que hay que destacar es que hay que realizar los trabajos de MR&I sobre instalaciones que están en servicio. Por ello, la planificación de los trabajos hay que realizarla de forma que afecte lo mínimo posible al funcionamiento diario de la instalación. No son deseables actuaciones que realicen mejoras menores en el desempeño de la red a cambio de grandes perturbaciones en el funcionamiento de la misma durante los trabajos.

Este trabajo se centra en actuaciones técnicamente complejas pero sin riesgos en los resultados directos, sujetas a incertidumbre en los

beneficios obtenidos, normalmente, por factores ajenos a la propia actuación.

2.6. El problema de la selección proyectos de mantenimiento ferroviario.

La selección de los proyectos a realizar es un tema altamente complejo. Por un lado, cualquier método de selección de proyectos ha de elegir entre una información muy detallada o una información no tan buena pero más rápida, para poder evaluar diferentes proyectos. La evaluación previa de los resultados que se pueden conseguir en los proyectos de mantenimiento ferroviario es difícil. Para poder analizarlos es necesario disponer de información muy desarrollada, que en la mayor parte de los casos implicaría realizar, como mínimo, un anteproyecto que permitiera evaluar las soluciones técnicas y estimar costes para cada posible solución. Esto supone un alto coste de ingeniería.

Pese a esto, además, como ya se ha comentado en el apartado anterior, en este tipo de proyectos no se conoce la totalidad del efecto de la actuación, por estar implicados otros actores con su propia agenda, principalmente los operadores ferroviarios, por lo que, lo habitual, es que existan medidas muy eficaces pero que sean las que más implicación requieran de otros actores y las que más riesgos de implementación incorrecta sufran. El gran problema existente en la planificación de proyectos de transporte es, como describen (Flyvbjerg et al., 2003), la gran incertidumbre y las desviaciones en costes y plazos en la mayor parte de los proyectos de infraestructuras de transporte a nivel mundial.

Por otro lado, las metodologías existentes para evaluación de proyectos y toma de decisiones son variadas. El análisis Coste-Beneficio es uno de los métodos más extendidos en los procesos de toma de decisiones en la selección de proyectos de infraestructuras ferroviarias, ya sea a nivel general o específico en proyectos de MR&I, (Econom & Transporte, n.d.) o en manuales como (Mendoza et al., 2006) para el Banco Interamericano de Desarrollo. Como ejemplos de CBA tendríamos (Damart & Roy, 2009) que estudian la interacción entre el análisis técnico de CBA (Análisis Coste-Beneficio por sus siglas en inglés) y la gestión de las diversas partes interesadas en el proyecto.

Estos autores realizan un estudio crítico del CBA aplicado al análisis de proyectos. Los principales problemas recopilados por estos autores son:

- La no objetividad de los valores construidos para representar variables no económicas del proyecto. (polución, vidas humanas, tiempos de viaje).
- El reducido peso del futuro en las consideraciones económicas.
- Los grandes errores en los modelos de demanda de tráfico.
- La no inclusión del cambio de comportamiento y de modelos sociales que afecta al uso de la infraestructura.
- La arbitrariedad en los valores dados a los parámetros no monetarios.

Algunos de estos problemas están en la base de las hipótesis de partida del CBA, en la que se supone que existe un valor exacto al que aproximarse, basándonos en el supuesto del "valor revelado" al detectar los cambios en la demanda revelados al cambiar los parámetros del sistema.

Por otro lado, estas medidas imperfectas no se deben sólo a la imposibilidad de obtener los valores intrínsecos para nuestra sociedad en un momento dado del tiempo sino que de hecho, surge la siguiente cuestión ¿tienen los fenómenos sin un precio de mercado directo un valor inherente para la sociedad que puede ser revelado por CBA? Según (Damart & Roy, 2009) más que un valor exacto existen tendencias o patrones a considerar.

Según estos autores, las limitaciones del CBA aparecen en varias de las hipótesis de partida de estos modelos, como son:

- El considerar la sociedad como un bloque monolítico, con el único objetivo de maximizar el bienestar colectivo.
- Los beneficios colectivos tienen sentido si los beneficios obtenidos por una parte de los actores se redistribuyen hacia los actores que pagan los costes.
- El CBA implica el estudio exhaustivo de todos los costes y beneficios de todos los proyectos de forma neutral. La exhaustividad completa se considera no realista, e incluso en los países donde se está utilizando de forma más intensa el CBA se han tenido que introducir factores correctores para tener en cuenta las implicaciones no contempladas en el CBA.
- En el CBA los prejuicios, sesgos y parcialidades a la hora de realizar los análisis y asumir determinadas hipótesis tienen mucha influencia sobre los resultados obtenidos, y no son aparentes, como es el caso de la sobreponderación sistemática en

Francia de los proyectos de carreteras frente a los ferroviarios en el ámbito de las mercancías y cómo esas evaluaciones subjetivas han hecho que se seleccionen sistemáticamente proyectos que han cambiado la estructura de demanda de transporte hacia la carretera.

Estos autores también recomiendan que el resultado del análisis CBA no sea un número puro, sino que tenga incertidumbre y que cualquier propuesta de modificación se evalúe sobre la base de los cambios que genera tanto en el análisis como en su varianza. También recomiendan el uso de técnicas multicriterio para una primera fase de análisis, en la que ya participen todas las partes interesadas, con unos datos preliminares de los proyectos y que el CBA se realice posteriormente sobre unos proyectos más definidos, ya preseleccionados y ajustados en sus características principales por las partes interesadas, en un proceso de debate y acuerdo público.

(Olsson et al., 2012) han estudiado el CBA en proyectos ferroviarios de forma comparada en varios países de la UE, donde se puede ver la diferencia en los valores económicos aplicados en cada país, tanto en tiempos de amortización, tasas de interés y valoraciones económicas de los ahorros de tiempo. En la mayoría de los proyectos el beneficio proviene del ahorro del tiempo de viaje, que se considera tiempo inútil, de la reducción de accidentes y de la reducción de la contaminación ambiental. La UE tiene entre sus objetivos el transferir parte del transporte por carretera al ferrocarril por los beneficios medioambientales que genera (E. Commission, 2011). Los resultados de los ya citados autores muestran que los resultados son fuertemente dependientes de la metodología específica y de los valores usados en cada país. Esta alta variabilidad se puede explicar por la presencia de un análisis multicriterio previo (formal o informal) del que dependen los valores adoptados por los parámetros del modelo CBA específico adoptado en cada país. Esto demuestra que el análisis CBA no es un método neutro y que la subjetividad no es explícita sino que está oculta en las hipótesis realizadas ex-ante (Olsson et al., 2012).

La Tabla 2 2 muestra la dispersión de los valores usados para valorar el coste del tiempo de viaje en varios países de la UE. Se puede apreciar las grandes diferencias en las valoraciones. Datos obtenidos de la guía para CBA en proyectos de infraestructura editada por la UE en 2008 (Breu et al., 2008).

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

País	Avión	Autobús	Automóvil/tren
Austria	39,11	22,79	28,40
Bélgica	37,79	22,03	27,44
Bulgaria	13,35	7,78	6,69
Chipre	29,04	16,92	21,08
Chequia	19,65	11,45	14,27
Dinamarca	43,43	25,31	31,54
Estonia	17,66	10,30	12,82
Finlandia	38,77	22,59	28,15
Francia	38,14	22,23	27,70
Alemania	38,37	22,35	27,86
Grecia	26,74	15,59	19,42
Hungría	18,62	10,85	13,52
Irlanda	41,14	23,97	29,87
Italia	35,29	20,57	25,63
Letonia	16,15	9,41	11,73
Lituania	15,95	9,29	11,58
Luxemburgo	52,36	30,51	38,02
Malta	25,67	14,96	18,64
Países Bajos	38,56	22,47	28,00
Polonia	17,72	10,33	12,87
Portugal	26,63	15,52	19,34

Rumania	13,47	7,85	9,78
Eslovaquia	17,02	9,92	12,36
Eslovenia	25,88	15,08	18,80
España	30,77	17,93	22,34
Suecia	41,72	24,32	30,30
Reino Unido	39,97	23,29	29,02
UE (25)	32,80	19,11	23,82
Suiza	45,41	26,47	32,97

Tabla 2 2. Coste estimado del tiempo de viaje (€/km) en los países de la UE, a precios del 2002. elaboración propia a partir de (Breu et al., 2008)

(Salling & Leleur, 2011) presentan el sistema CBA Danés, que integra la incertidumbre (varianza debido a factores desconocidos) y la variabilidad (varianza en los datos conocidos) mediante una simulación Montecarlo para intentar desvelar la distribución de posibles resultados y no sólo un valor determinista. La solución adoptada permite el obtener una distribución de resultados con su probabilidad e identificar cuáles son los factores que más afectan a la rentabilidad de la infraestructura, en este caso, los costes de construcción y los ahorros de tiempo obtenidos.

(Bruzelius, Flyvbjerg, & Rothengatter, 2002) muestran la importancia de integrar el CBA en un sistema de evaluación de proyectos más completo, donde primero se definan las necesidades que ha de cubrir el sistema para mejorar la transparencia y reducir los riesgos que tiene cualquier proyecto de infraestructura, principalmente a base de controlar las incertidumbres en los principales factores generadores de riesgo, que son:

- Riesgos en coste.
- Riesgos en demanda.
- Riesgos financieros.
- Riesgos políticos.

(Morusugi, 2000) describe la metodología utilizada en Japón, donde el análisis CBA únicamente se utiliza para pre-evaluar el proyecto,

colocándolo, si alcanza un mínimo, en el panel a comparar mediante técnicas multicriterio, donde realmente se priorizan los proyectos a ejecutar.

(van Wee, 2012) estudia las implicaciones del CBA desde un punto de vista ético, ya que desde su fundamento utilitarista, solo se mide la bondad de una solución (infraestructura de transporte en este caso) a partir de sus consecuencias y específicamente de la disponibilidad para pagar, por lo que no tiene en cuenta factores externos a las personas. según este autor el CBA valora más las prioridades de las rentas altas que las bajas (proyectos en regiones ricas son más rentables porque los ahorros de coste en tiempo son más altos) y no tiene en cuenta efectos de distribución ni otros factores a maximizar como el bienestar o la accesibilidad. (van Wee, 2012) concluye que el CBA es aplicable de forma independiente cuando se comparan proyectos similares donde los actores implicados son los mismos (por ejemplo, diferentes variantes de ubicación de una estación ferroviaria) y que, en el resto de los casos, se ha de complementar con análisis de al menos los siguientes factores:

- Distribución de los beneficios en la población.
- Indicadores de accesibilidad por sectores de la población.
- La valoración de los criterios subjetivos mediante análisis multicriterio.

Tal y como se ha visto en las referencias anteriores, el uso de técnicas de ayuda a la decisión como el CBA, que convierte todos los criterios a una función de utilidad lineal (usando el valor económico como medida de utilidad) tiene muchas limitaciones, que crecen a medida que los costes y problemas de un proyecto los sufren unos actores y los beneficios los obtienen otros, se realiza compensación (por el uso de una función de utilidad monocriterio lineal) y existen prejuicios y parcialidades que no se tienen en cuenta.

(Mouter, Annema, & Wee, 2013) realizan un estudio sobre la percepción del uso del CBA en Holanda por parte de los actores implicados en la planificación de infraestructuras. La percepción depende del tipo de actor y en general recomiendan el uso del CBA pero no como única herramienta de planificación y siendo conscientes de las limitaciones en sus resultados.

(Damart & Roy, 2009) llegan a la conclusión de que el CBA no es suficiente y se ha de acudir a herramientas multicriterio para poder evaluar proyectos con múltiples partes interesadas y en la que importancia de factores diferenciados es alta.

Otro trabajo a considerar es el de (Flyvbjerg, 2009) que recomienda el uso del "Pronóstico por clase de referencia", una metodología de Pronóstico que se compone de las siguientes fases:

- Identificación de una clase de referencia de proyectos pasados relevante.
- Establecer una distribución de probabilidad para cada clase de referencia.
- Comparar el proyecto específico con la distribución de la clase de referencia para establecer el resultado más probable para el proyecto específico.

En el análisis CBA, los proyectos se consideran independientemente, como lo hace la mayor parte de la literatura sobre gestión de proyectos. Los proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en ferrocarriles actúan sobre el sistema ferroviario en servicio, con el objetivo común de mejorar su funcionamiento. Cada proyecto realizado tiene consecuencias sobre el resto de la red y una vez finalizado las condiciones del resto de proyectos o alternativas han cambiado.

Debido a esto no solo se han de estudiar la idoneidad de los proyectos de forma aislada, sino que se han de enmarcar dentro de un conjunto de proyectos y actuaciones sobre la red. La gestión de proyectos en ese ámbito se denomina *gestión de programas* (programme management) y es una parte de la gestión de proyectos con mucho desarrollo en los últimos años. (Lycett, Rassau, & Danson, 2004) definen la gestión de programas como "La integración y gestión de un grupo de proyectos relacionados con el objetivo de conseguir unos beneficios que no se obtendrían de gestionarse los proyectos de manera independiente." El PMBoK los define como "un conjunto de proyectos relacionados entre sí y de cambios organizativos que se llevan a cabo para alcanzar una meta estratégica y para entregar los beneficios que espera una organización" (NCB v3.1 pag 155)".

La gestión de programas, aunque relacionada, es diferente a la gestión de carteras ya que una cartera de proyectos es un conjunto de proyectos o programas, no necesariamente relacionados, reunidos a efectos de control, coordinación y optimización (NCB 3.1). Según (Pellegrinelli, Partington, Hemingway, Mohdzain, & Shah, 2007) las principales diferencias entre la gestión de proyectos y la gestión de programas son que los programas no tienen una fecha de finalización y son marcos estructurales generales en los que encajan los proyectos y el uso del

marco conceptual de la gestión de los proyectos no es válido para trabajar con programas.

Un programa no tiene unos objetivos tan definidos como un proyecto, sino que tiene unos objetivos generales y el contenido del programa se va desarrollando de forma incremental, controlando los elementos del programa manteniendo siempre el enfoque en la satisfacción de los objetivos generales del programa. El ciclo de vida del programa ha de distinguir muy bien entre la justificación del programa en su conjunto y la justificación de los proyectos individuales dentro de él. (Lycett et al., 2004)

Existen diferentes modelos de gestión de programas. (Pellegrinelli et al., 2007) define dos grandes grupos de modelos:

- Los basados en la aplicación de técnicas de gestión de proyectos.
- Los basados en las técnicas de dirección estratégica y liderazgo.

En (Partington, Pellegrinelli, & Young, 2005) se explican las diferencias entre ambos modelos y la complejidad del cambio cultural de uno a otro modelo. (Aritua, Smith, & Bower, 2011) recomiendan mejorar la distinción entre programas y proyectos y aplicar técnicas diferenciadas para la gestión de riesgos en proyectos y en programas.

(Thiry, 2004) propone un ciclo de gestión de programas basada en conceptos de estrategia y no de gestión de proyectos.

Las etapas que propone para el ciclo son:

- Formulación. Identificación de las presiones internas y externas de cambio y determinar cómo gestionarlas para maximizar el beneficio.
- Organización. Creación del plan estratégico del programa. Definición de proyectos específicos.
- Despliegue. Realización del plan/proyectos diseñados.
- Evaluación. Estudiar los resultados obtenidos y compáralos con los previstos, reevaluación de los factores iniciales y sus cambios.
- Disolución. Una vez alcanzados los objetivos iniciales o desaparecida la necesidad del programa, se finaliza.

Esta estrategia general es compatible con el uso de técnicas de ACB, análisis multicriterio o pronóstico por clase de referencia, que se enmarcan dentro del proceso de creación del plan estratégico del programa, para seleccionar los proyectos a realizar y su encaje temporal. Este enfoque se adapta especialmente bien al ámbito de los proyectos de

MR&I en ferrocarriles donde los objetivos generales se han de concretar en un programa de proyectos dedicados a satisfacerlos.

Por otro lado, es habitual en el ámbito de Dirección de Proyectos utilizar el término “cartera” referido a la gestión de un conjunto de proyectos. Según la (International Project Management Association, 2009), una cartera es un conjunto de proyectos, no necesariamente relacionados entre sí, reunidos a efectos de control, coordinación y optimización. (Kester, Hultink, & Lauche, 2009) explican cómo la gestión de carteras se diferencia de la gestión individual de proyectos en que es un proceso interrelacionado de toma de decisiones para alcanzar los objetivos de la empresa mediante un uso eficaz de los recursos disponibles. En su artículo hacen mención a la complejidad de generar carteras de proyectos equilibradas en el largo plazo que no comprometan el crecimiento futuro de la compañía. (Cooper & Edgett, 2001) definen los tres elementos fundamentales de una cartera de proyectos equilibrada; Alineamiento estratégico (alineación entre los objetivos de la empresa y los de la cartera de proyectos), maximización del valor (ratio óptimo entre recursos invertidos y resultados) y equilibrio (Armonía en la cartera de proyectos según parámetros como riesgo, innovación disruptiva o incremental y otros). En la medida que la cartera de proyectos cumpla estas condiciones el desempeño a largo plazo será mejor.

Tras este análisis de las definiciones de cartera y programa de proyectos, en este trabajo se ha llegado a la conclusión, basada en las referencias anteriores que el problema que se plantea consiste en gestionar “la cartera de proyectos de MR&I” de una determinada zona de ADIF.

2.7. Proceso de toma de decisiones actual y sistemas de apoyo a la decisión utilizados.

En presente trabajo no se han encontrado referencias sobre el uso, por parte de ADIF, ni por ninguna administración ferroviaria española ni europea, de herramientas de análisis multicriterio para ayudar a resolver el problema de selección de proyectos. El ministerio de Fomento publicó en el año 2010 una metodología de cálculo de análisis coste beneficio para proyectos de infraestructura en España, para su uso, tanto interno como por el resto de administraciones públicas españolas. Esta metodología, aunque repasa el estado del arte en CBA y realiza recomendaciones muy interesantes de cara a la evaluación económica y

financiera de los proyectos, no incluye el uso de técnicas multicriterio (de Rus et al., 2010).

A nivel internacional existen varias experiencias documentadas de evaluación de proyectos de transporte, a nivel de muy grandes proyectos. (Ülengin, Önsel, İlker Topçu, Aktaş, & Kabak, 2007) estudiaron las relaciones entre los diversos modos de transporte y las variables que les afectan, para estimar los niveles de inversión óptimos en cada modo de transporte, en diferentes escenarios económicos y sociales mediante mapas de relaciones bayesianas. (Kwok, Anderson, & Ng, 2010) minimizan costes del ciclo de vida del sistema de transporte mediante el estudio de los vectores de coste (Cost Drivers) del proyecto. Para el caso de la selección de un proyecto de renovación de una zona urbana entre varias alternativas (Ivanović, Grujičić, Macura, Jović, & Bojović, 2013) utiliza ANP para realizar el análisis multicriterio. (Macharis, De Witte, & Turksin, 2010) describen el MAMCA (Multi actor, Multi criteria analysis) usado por el gobierno regional Flamenco para evaluar los proyectos de transporte considerando múltiples partes interesadas y múltiples criterios, integrándolos mediante AHP. (Macharis & Bernardini, 2015) describe el aumento del uso de métodos multicriterio en la evaluación de proyectos de transporte en los últimos años a nivel mundial. (Tsamboulas, 2007) utiliza el método MAUT para evaluar proyectos internacionales de infraestructura ferroviaria y priorizar su ejecución, usando el método AHP para ponderar los criterios. (Mandic, Jovanovic, & Bugarinovic, 2014) realiza una evaluación TOPSIS en dos fases para clasificar un grupo muy grande de proyectos en grupos y realizar la priorización dentro de cada grupo comparable.

El estado actual de la evaluación de proyectos de transporte en España es, según (Betancor, 2009): "En comparación con la experiencia internacional, la cultura de la evaluación económica de proyectos en España es, hasta el momento, relativamente más escasa. En la construcción de infraestructuras predomina la visión tecnológica y cierta mitificación del impacto económico de la obra pública en la economía. El concepto de coste de oportunidad en la utilización de los fondos públicos no está interiorizado en la política de las decisiones de inversión pública, y con demasiada frecuencia vemos como la nueva construcción predomina sobre el mantenimiento y la conservación de lo existente, o cómo entre las alternativas disponibles para un mismo objetivo, la más costosa o la que incorpora la última tecnología suele ser la que se elige sin la debida consideración a su rendimiento por unidad monetaria invertida."

A un nivel más local, con proyectos de menor repercusión sobre el desempeño de la red de transportes multimodal, los departamentos de mantenimiento de los administradores ferroviarios, tanto a nivel central como territorial realizan un análisis individual de los proyectos, sin análisis comparativo, asignando los recursos de forma proporcional a las necesidades percibidas y buscando la mejora de los puntos débiles percibidos en la infraestructura.

Esta manera de trabajar sin herramientas de apoyo ni documentos que justifiquen la elección de los proyectos, se puede considerarse aceptable, principalmente por la profesionalidad y experiencia de los técnicos, pero tiene el inconveniente de no tener trazabilidad. Esta forma de evaluar los proyectos está sujeta al sesgo optimista (Salling & Banister, 2009) y a la falacia de planificación (Buehler, Griffin, & Peetz, 2010). En este caso, al ser los mismos técnicos los que realizan la selección de proyectos y los que han de ejecutarlos y mantenerlos posteriormente, tienen todos los incentivos posibles para realizar los proyectos que maximicen la utilidad desde un punto operativo y de mantenibilidad, perdiendo la perspectiva de otros criterios, como el económico, que pueden ser tanto o más importantes que los anteriores.

Existen publicaciones donde se presentan metodologías para mejorar esta toma de decisiones como por ejemplo, (Durango-Cohen & Sarutipand, 2009), que utilizan cadenas de Markov para la selección de acciones de mantenimiento en una infraestructura de transporte, centrado en la selección de unos tiempos de actuación óptimos para minimizar la afección a los usuarios y el coste social de la infraestructura. Los métodos publicados están aplicados a actuaciones menores o a la priorización en el tiempo de una cartera de proyectos definida, no a la selección de una cartera óptima.

Con todo lo anterior, podemos afirmar que, en el ámbito de la selección de proyectos de mejora en infraestructuras ferroviarias no existen análisis basados en técnicas multicriterio, habiendo un vacío teórico y práctico que podría ser completado generando una mejor selección de las carteras de proyectos por parte de los decisores en los administradores de infraestructuras, evitando los principales problemas presentes en la evaluación de proyectos de transporte.

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

Capítulo 3

Proceso de decisión multicriterio y el método AHP/ANP

3.1. Introducción.

“Decidir es una tarea muy compleja y difícil” (Denis Bouyssou, Marchant, Pirlot, Tsoukiàs, & Vincke, 2006). Una decisión compleja se caracteriza: por el número de alternativas planteadas, por tener diferentes criterios a tener en cuenta de modo que ninguna alternativa pueda satisfacer a la vez plenamente, por la participación de diferentes actores afectados o interesados en el proceso, por la cantidad de datos que hay que procesar y porque se maneja información cualitativa para la evaluación de determinados criterios (Goodwin & Wright, 2004).

Para afrontar decisiones complejas surge el Análisis de Decisiones que consiste en un “marco racional y un conjunto de herramientas para tratar con problemas que conllevan decisiones difíciles. La intención es ayudar al decisor a reflexionar de manera sistemática sobre problemas complejos para mejorar la calidad de las decisiones finales. En este campo lo

importante no es que la decisión sea la acertada, sino que se haya llegado a ella correctamente. A una buena decisión se llega a través de un profundo conocimiento, meditación y comprensión del problema, mientras que un buen resultado, es independiente de la calidad de la decisión” (Ríos Insua, Bielza Lozoya, & Mateos Caballero, 2002).

Dentro del problema general de toma de decisiones multicriterio, cuyas siglas en inglés es MCDM (Multi Criteria Decision Making) se pueden plantear básicamente dos tipos de problemas, basándonos en las características de las alternativas (Korhonen, Moskowitz, & Wallenius, 1992):

1. El conjunto de alternativas posibles es numerable. En este caso, el problema de decisión es discreto. Se suele asumir que las alternativas consideradas están definidas explícitamente, su número no es muy elevado y no cambia durante el análisis.
2. El conjunto de alternativas posibles no es numerable. En este caso el problema de decisión es continuo, las alternativas están definidas de una forma implícita.

El problema que se afronta en esta tesis se encuadra dentro del tipo 1 en el que el conjunto de alternativas es numerable, pero la característica fundamental es el gran número de actuaciones de mantenimiento que se plantean. Para abordar los problemas discretos, en la actualidad la mayoría de autores se decantan por el término Análisis Multicriterio de Decisiones, (siglas en inglés Multi Criteria Decision Analysis, MCDA). El MCDA se define como “Un término amplio que incluye una colección de conceptos, métodos y técnicas que persiguen ayudar a los individuos o grupos a tomar decisiones que implican diferentes puntos de vista en conflicto y múltiples agentes interesados” (Belton & Stewart, 2002).

La solución a un problema de decisión se puede interpretar de varias maneras, según el problema particular y el entorno de decisión específico. Por un lado puede ser elegir la "mejor" alternativa de un conjunto de alternativas posibles. La "mejor" se ha de interpretar como la alternativa preferida del decisor. Por otro lado la solución puede ser el seleccionar un pequeño conjunto de alternativas de alta preferencia del conjunto general o agrupar las alternativas en varios grupos de preferencia (Roy, 1991).

Como dicen (Roy & Vincke, 1981) "Hasta el desarrollo del análisis multicriterio, los problemas de decisión se resolvían mediante la optimización de una función objetivo o una función de utilidad. Esta técnica tiene la ventaja de obtener unos problemas matemáticamente bien definidos pero que no son siempre representativos de la realidad. De Hecho la comparación las diferentes alternativas posibles raramente se

hace desde un solo punto de vista y las preferencias desde un solo punto de vista son difícilmente modelables por una función".

En el mismo artículo Roy y Vincke también exponen los problemas principales de todos los métodos de análisis multicriterio." El principal inconveniente de un problema multicriterio es que no está bien definido matemáticamente. En general suele haber contradicciones entre los diferentes puntos de vista considerados, de forma que la mejor acción según un criterio puede ser peor para otro. En estos casos hay dos actitudes que son inútiles.

- Dejarle al decisor completa libertad para tomar la decisión.
- Introducir, de forma consciente o no, hipótesis restrictivas de forma que los problemas puedan ser resueltos por el método clásico.

Los métodos usados para el análisis multicriterio se encuentran entre estos dos extremos, están basados en modelos construidos parcialmente en hipótesis matemáticas restrictivas pero también en información recopilada por el decisor. De esta forma el análisis multicriterio constituye un ejemplo de la evolución del científico en los problemas de decisión, los problemas ya no se resuelven sustituyendo al decisor por un modelo matemático, sino ayudando al decisor a construir la solución describiendo sus posibilidades.

El problema que se plantea en esta tesis es el clásico problema que se aborda mediante técnicas basadas en MCDA, en el que:

- Hay un conjunto finito de alternativas o acciones posibles.
- El contexto de la decisión está determinado.
- Un decisor o conjunto de decisores han de seleccionar la mejor alternativa u ordenar el conjunto de alternativas por preferencia.
- La ordenación ha de tener en cuenta diferentes criterios o puntos de vista en conflicto.
- La importancia de cada criterio es diferente.

Para ayudar a resolver este problema hay diferentes métodos propuestos en la bibliografía. Entre los más conocidos destacan los siguientes:

- Métodos basados en la Teoría de la Utilidad Multiatributo (MAUT) (R L Keeney & Raiffa, 1976).
- AHP (Saaty, 1980), (Saaty, 1994a) y ANP (Saaty, 2001) (Saaty, 2005).

- Métodos de sobreclasificación (Outranking methods) como la familia de métodos ELECTRE (Roy, 1991) o PROMETHEE (Brans, Vincke, & Mareschal, 1986).
- TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) (Yoon & Hwang, 1981).

Una descripción más detallada de estos métodos se puede encontrar en (Pomerol & Barba-Romero, 2000) (Belton & Stewart, 2002), (Figueira, Greco, & Ehrgott, 2005), (Ishizaka & Nemery, 2013). (Wallenius et al., 2008) realizan un profundo estudio bibliográfico sobre el desarrollo de las técnicas MCDM desde los años 1992 hasta 2007, que pone al día un trabajo previo similar de los mismos autores. En este estudio se analizan artículos publicados en la Web of Knowledge y se concluye el desarrollo exponencial de estas técnicas, tanto desde el punto de vista teórico como de las aplicaciones en muy diversos campos. También destacan los autores de este trabajo que la técnica más utilizada de un modo sobresaliente es AHP. Este resultado lo apoyan otros autores como (Alharbi, 2001), (Vaidya & Kumar, 2006), (Macharis & Bernardini, 2015), (Taylor, Kabir, Sadiq, & Tesfamariam, 2013a). Otro método bastante utilizado en la literatura, aunque con mucha menos frecuencia es la familia de métodos PROMETHEE (Behzadian, Kazemzadeh, Albadvi, & Aghdasi, 2010)

La selección del modelo matemático adecuado para afrontar un problema MCDA discreto no es sencillo. (Guitouni & Martel, 1998) hicieron un estudio del tipo de método de análisis multicriterio a usar según el tipo de problema, llegando a las siguientes recomendaciones:

- Determina las partes interesadas del proceso de decisión. Si hay muchas partes interesadas, se debe adoptar métodos de toma de decisión en grupo o sistemas de ayuda a la decisión en grupo (GDSS)
- Hay que tener en cuenta la forma de pensar del decisor a la hora de elegir un método de determinación de preferencias. ¿Si está más cómodo con comparaciones pareadas, por que usar compensación o viceversa
- Ten en cuenta la problemática de decisión del caso, si el decisor requiere de ordenación de alternativas, es mejor utilizar un método de ordenación de alternativas.
- Elige el método de ayuda a la decisión multicriterio que pueda manejar adecuadamente la información disponible y para el que el decisor pueda conseguir la información adecuada. La

calidad y cantidad de información disponible son factores muy importantes para la selección del método adecuado.

- El grado de compensación del método utilizado es un aspecto muy importante y hay que explicárselo al decisor adecuadamente. Si rechaza usar compensaciones, entonces habrá que descartar muchos métodos.
- Las hipótesis fundamentales del método se han de cumplir, sino habrá que rechazar el uso del método.
- El sistema de ayuda a la decisión que acompaña al método también es un factor importante a considerar.

De acuerdo con (D Bouyssou et al., n.d.) no hay un método mejor que otro, ya que todas las técnicas MCDA tienen ventajas y desventajas. La técnica más adecuada depende de las condiciones específicas de utilización, principalmente del tipo de problema de decisión, del número de decisores y del tipo de información disponible para realizar el análisis. A fin de cuentas, como expone (Zanakis, Solomon, Wishart, & Dublisch, 1998) un método MCDM no se puede considerar una herramienta para descubrir una "verdad objetiva", sino que ha de funcionar dentro de un contexto para ayudar al decisor a aprender sobre el problema y las soluciones posibles. De ahí que se suele utilizar el término "ayuda a la decisión" más que "toma de decisiones".

Según (Saaty & Peniwati, 2008) decidir es elegir la mejor acción. Tomar decisiones requiere juicio y los juicios dependen de los sentimientos y de los pensamientos y también de la capacidad para interpretar la información de estos sentimientos mediante diferentes niveles de intensidad de preferencia, importancia o probabilidad. El propósito de "pensar acerca de la toma de decisiones" es para ayudar a los individuos a tomar decisiones de acuerdo con sus valores, creencias y convicciones. La cuestión fundamental del proceso de toma de decisiones, según estos autores, es cómo medir la intensidad de los sentimientos y los juicios de la gente.

El método de toma de decisiones seleccionado en esta tesis es el AHP/ANP. Como se describirá posteriormente, AHP es un caso particular de ANP. Las razones para la utilización de este método son: i) permite a los responsables de la decisión utilizar un modelo sistemático que descompone el principal problema en subproblemas más simples y abordables que les permite "medir" sus preferencias de un modo relativamente sencillo, ii) el análisis detallado de las prioridades y de las interdependencias entre los elementos del sistema provoca en los

responsables de la decisión una reflexión profunda sobre sus prioridades y sobre el propio problema de decisión en sí mismo, lo cual produce un mejor conocimiento del problema y conduce a una decisión más fiable, iii) si hay interdependencias entre los grupos de elementos (criterios y alternativas) se debería utilizar ANP, que el método más reconocido actualmente para abordar procesos de decisión muy complejos.

Este trabajo de investigación, cuyo caso de estudio se describirá en el capítulo 4, se centra en el análisis de las alternativas planteadas (un número muy elevado de proyectos de MR&I), en los criterios que hay que considerar para evaluarlas y en la ponderación de los mismos, de acuerdo con el proceso de decisión que se describe en el siguiente apartado.

3.2. Proceso de decisión multicriterio.

En este apartado se van a revisar las propuestas del proceso de resolución de un problema multicriterio discreto.

Cada problema de decisión es completamente diferente a los demás. Aunque un decisor tenga que afrontar siempre el mismo tipo de problema de decisión, las condiciones de aplicación del mismo y el objetivo del problema en sí mismo hacen de cada situación un problema específico. Por ello la experiencia de haber tomado una decisión importante con frecuencia parece tener escaso valor cuando nos enfrentamos a la siguiente. La conexión entre unas decisiones y otras no está en la solución adoptada sino en el método seguido para adoptarla (Hammond, Keeney, & Raiffa, 2002). Según (Einstein & Infeld, 1939), la formulación de un problema es casi más esencial que su solución, que puede ser solo una aplicación de habilidad matemática o experiencia.

Hay que aplicar un procedimiento. El que dé el mejor resultado con la mínima pérdida de tiempo, energía, dinero y compostura. Según (Hammond et al., 2002), un proceso de toma de decisiones es eficaz cuando:

- Se concentra en lo importante.
- Es lógico y consecuente.
- Reconoce los factores tanto subjetivos como objetivos y combina el pensamiento analítico y el intuitivo.

- Sólo exige la cantidad de información y análisis necesarios para resolver un problema específico.
- Fomenta y guía la recopilación de información pertinente y de opiniones bien fundadas.
- Es directo, confiable, fácil de aplicar y flexible.

(Belton & Stewart, 2002) plantean un proceso general de resolución del problema de decisión basado en las siguientes fases:

1. Identificación del problema. A menudo no se presta atención a la especificación del problema. Hay que dedicar tiempo a analizar detenidamente el problema de decisión que se plantea y el o los objetivos que se pretenden alcanzar. En ocasiones el problema no es evidente y hay que dedicar tiempo a la reflexión, previamente a cualquier otra consideración.
2. Estructuración del problema. En esta fase hay que analizar los valores que guían al decisor y el entorno, tanto de la decisión como del decisor, para plantear el problema detalladamente incluyendo todos los condicionantes necesarios en el modelo.
3. Construcción del modelo. Consiste en expresar la jerarquía de objetivos hasta establecer unos criterios que permitan valorar cuantitativamente el grado de cumplimiento de los objetivos del nivel superior, hay que ponderar los criterios, valorar las alternativas respecto a cada criterio y agregar las valoraciones.
4. Utilización del modelo para informar y generar conocimiento. Una vez obtenidos los resultados hay que interpretarlos y hacer análisis de sensibilidad que permitan conocer la robustez de los resultados obtenidos.
5. Desarrollo de un plan de acción. Con toda la información generada el decisor puede adoptar la solución que considere más acertada y llevarla a la práctica.

El método PROACT, propuesto por (Hammond et al., 2002), es un método práctico que permite otra forma de poner en práctica el proceso de decisión multicriterio. Se basa en los siguientes pasos:

1. Definir el problema con precisión:
 - Plantear el problema: ¿Qué es lo que hay que decidir?.

- Reconocer su complejidad.
 - Evitar suposiciones precipitadas y prejuicios.
2. Especificar objetivos:
 - Definir intereses, valores, temores, aspiraciones, preocupaciones.
 - Definir qué es lo que se desea alcanzar.
 3. Crear alternativas imaginativas.
 4. Entender las consecuencias:
 - ¿Hasta qué punto satisfacen las alternativas los objetivos?
 5. Estudiar las transacciones:
 - Los objetivos muchas veces son contradictorios entre sí.
 - Por eso es preciso encontrar un justo medio. Hay que sacrificar un poco de “esto” a cambio de un poco de “aquello”.
 6. Aclarar las incertidumbres:
 - ¿Qué puede suceder en el futuro y qué posibilidades hay de que suceda otra cosa?
 - Hay que juzgar la probabilidad de distintos resultados y evaluar posibles impactos.
 7. Pensar muy bien la tolerancia al riesgo:
 - Cuando se toman decisiones en situaciones de incertidumbre, la consecuencia que se busca puede no ser en realidad la que resulta.
 8. Considerar decisiones vinculadas:
 - Lo que se decide puede influir en las decisiones de mañana y las metas de mañana influir sobre las decisiones de hoy.

(Henig & Buchanan, 1996) proponen un proceso general de toma de decisiones multicriterio con los siguientes 5 pasos:

- Identificación de las alternativas.
- Identificación de los criterios de decisión.
- Construcción de un modelo matemático que representa las preferencias del decisor.
- Resolución del modelo.
- Validación de los resultados.

(Pastor-Ferrando, 2007) presenta un proceso general de toma de decisiones, basado en los siguientes pasos:

1. Inicialmente, se identifica la necesidad de resolver un problema de decisión.

2. Una vez identificado el siguiente paso debería ser formar un grupo de trabajo para estudiar el problema.
3. En la etapa de planteamiento del problema, se busca identificar adecuadamente cuál es el problema a resolver. Se debería identificar todas las restricciones posibles: tiempo, recursos, información, qué actores deben participar en el proceso y cuáles no, cuándo se implementará la decisión adoptada, partes afectadas por la decisión, etc. Asimismo es un momento adecuado para esbozar y proponer criterios y alternativas.
4. Una vez identificado el problema, se debe contactar con las personas que puede ser interesante u obligatorio que participen en uno o varios momentos del proceso de resolución del problema de decisión. Este grupo de gente, junto con el equipo de trabajo, o al margen de éste (cuando el equipo de trabajo realiza funciones de facilitador de la decisión) serán los responsables de llegar hasta una solución.
5. La siguiente etapa consiste en analizar toda la información necesaria para resolver el problema.
6. En las etapas de síntesis, en paralelo a la recopilación de información, deben de identificarse las técnicas y modelos más adecuados, y obtenerse los criterios, las alternativas, los pesos de los criterios y las valoraciones de las alternativas para cada criterio.
7. Una vez que se dispone de todos los datos, éstos se deben procesar aplicando las técnicas de análisis.
8. Los resultados obtenidos deben revisarse y contrastarse con la experiencia y con el sentido común. En algunos casos puede ser necesario volver a realizar tareas de análisis del problema.
9. Una vez obtenidos unos resultados válidos, se debe comprobar la robustez de los mismos, recalculando el resultado al variar los pesos y las valoraciones de las alternativas.
10. Para finalizar, se deben revisar todos los resultados obtenidos y emitir un informe que recoja tanto las conclusiones obtenidas, como la descripción del proceso, y, si es necesario, una propuesta de decisión.

Estos procesos se puede concretar más al caso discreto con los siguientes pasos (Aragóns-Beltrán, Pastor-Ferrando, García-García, & Pascual-Agulló, 2010):

1. Formulación del problema
2. Análisis de las alternativas.
3. Selección de los criterios.

4. Ponderación de los criterios: Asignación de pesos (según método).
5. Valoración de las alternativas para cada criterio.
6. Aplicación de una técnica para la ordenación o selección de las alternativas.
7. Análisis de sensibilidad.
8. Informe final y aprobación del decisor.

3.3. Elementos de una decisión multicriterio.

3.3.1. Selección de criterios.

Según (Saaty & Peniwati, 2008), para tomar una buena decisión la gente no puede confiar únicamente en sus sentimientos. Tiene que tener en cuenta qué influye sobre su decisión. Los criterios de decisión constituyen los parámetros que se utilizan para mostrar las preferencias del decisor, son los elementos de referencia para realizar la decisión. Establecer los criterios de decisión es complejo y suele ser una de las partes más difíciles de un problema de decisión.

Según (Romero, 1993) el concepto de criterio engloba los conceptos de objetivo, atributo y meta:

- Un objetivo indica la dirección en la que la unidad decisora debería esforzarse para hacer las cosas mejor. Por ejemplo minimizar el presupuesto de ejecución de un proyecto.
- Los atributos son las características que definen a las alternativas y miden el grado de alcance o cumplimiento de un objetivo. Para cada alternativa se definen unos atributos que permiten definir la consecuencia de la decisión en relación con el sistema de preferencias del decisor. Los atributos siempre dan unos valores del decisor respecto a una realidad objetiva y se pueden expresar mediante una función matemática de variables de decisión, de tal forma que cada alternativa se puede caracterizar mediante un conjunto de medidas relacionadas con los objetivos del decisor. Por ejemplo: el volumen en euros del presupuesto total de ejecución de un proyecto.
- Una meta se define como el valor que cuantifica un nivel de logro aceptable que un atributo debe esforzarse por alcanzar. Por

ejemplo: que el presupuesto total de ejecución de un proyecto sea inferior a 600.000 euros.

Según (Ralph L Keeney, 1992) lo verdaderamente importante para encontrar la mejor decisión son los valores del decisor. Los valores son las cosas que importan al decisor y se hacen explícitos adoptando la forma de objetivos. Un objetivo, según este autor, es una frase sobre algo importante que se desea alcanzar como consecuencia de tomar la decisión. Indica la dirección de mejora preferida (si la seguridad es un valor importante cuando se va a adquirir un automóvil, el objetivo se expresaría con la frase “maximizar la seguridad”).

Según (Hammond, Keeney, & Raiffa, 2001), los objetivos que se fije el decisor permitirán guiar todo el proceso. Específicamente:

- Permitirán determinar qué información buscar.
- Ayudarán a explicar la elección a otros.
- Determinarán la importancia de una decisión y, por tanto, cuánto tiempo y esfuerzo merece dedicarle.

(Emberger, Pfaffenbichler, Jaensirisak, & Timms, 2008) definen una serie de puntos a tener en cuenta en procesos de toma de decisiones y la creación de los criterios, relacionados con el transporte urbano y estudian su aplicación en dos entornos de decisión muy diferentes, Europa y el sureste asiático. Consideran que un proceso de toma de decisiones ideal ha de ser basado en un plan, que incluya objetivos y problemas específicos a resolver. Los problemas se definen como fallos en la consecución de objetivos en las condiciones actuales o futuras.

Los componentes que ha de estudiar todo sistema de toma de decisiones según estos autores son:

- Objetivos. Declaraciones generales de los objetivos a conseguir, generados por consenso entre todas las partes interesadas.
- Instrumentos de política. Herramientas para resolver problemas y alcanzar objetivos, como políticas de precios, uso del terreno, gestión infraestructuras, construcción, etc.
- Barreras. Es un obstáculo que bloquea el uso de determinada herramienta o retrasa su ejecución, puede ser desde políticas, financieras o legales a de comportamiento o actitudes de decisores o usuarios.

- Estrategias. Es la combinación de diferentes instrumentos para alcanzar los objetivos, incluye el efecto sobre diferentes elementos de la combinación de todas las medidas realizadas.

A la hora de generar los criterios de un sistema de ayuda a la decisión en entornos de transporte es necesario incluir criterios que definan todos los componentes anteriores para que el planteamiento del problema sea completo y no incurrir en un análisis sesgado por la falta de visión general de todos los ángulos del problema planteado.

3.3.2. Selección de Pesos.

Tan importante como los criterios es la determinación de pesos. Los pesos o ponderaciones es la medida de la importancia relativa que los criterios tienen para el decisor.

En los problemas de toma de decisiones multicriterio es habitual que los criterios tengan diferente importancia para el decisor de ahí la necesidad de definir los pesos de cada criterio.

(Brugha, 1998) recomienda realizar las valoraciones de los criterios por criterio, es decir, valorar todas las alternativas respecto a un criterio a la vez y preferentemente comenzar a valorar de abajo a arriba. También recomienda comenzar por los criterios que están cualitativamente más cercanos y terminar por los más alejados.

(Belton & Stewart, 2002) realizan en el capítulo 5 de esta referencia un resumen del debate que el problema de la asignación de pesos a los criterios ha generado en la literatura. Actualmente, el método más aceptado es el que utiliza AHP. Este método utiliza el mismo procedimiento matemático para calcular los pesos de los criterios y las valoraciones de las alternativas para cada criterio, calculando el autovector asociado al autovalor dominante de las matriz de comparaciones por pares de los elementos del problema (criterios o alternativas).

(Wijnmalen & Wedley, 2009) expresan sus dudas sobre la independencia entre los pesos de las alternativas y los pesos de los criterios, recomendando que se tenga en cuenta el proceso de normalización a realizar a la hora de obtener los pesos de los elementos del problema, ya que una valoración no es independiente del proceso de normalización y se pueden producir inversiones de rango no deseadas y prioridades

incorrectas si se valora suponiendo un tipo de normalización y luego se normaliza de otra forma.

Los pesos obtenidos con AHP/ANP o con cualquier otro método son siempre una aproximación al valor óptimo, no pudiendo conocer además cuál es ese óptimo. (Keisler, 2008) demuestra que una vez se han seleccionado los criterios adecuados, la correcta valoración de los pesos es importante pero no crítica. En su caso de estudio se demuestra la utilidad de realizar análisis multicriterio frente a monocriterio y la resistencia de los resultados frente a cambios en los pesos.

3.3.3. Alternativas.

Las alternativas son el conjunto finito de posibles proyectos, soluciones, decisiones que hay que analizar durante el proceso de toma de decisión. Constituye el conjunto de opciones sobre la que el decisor realiza la acción decisora.

Las características que se le exigen a las alternativas son:

- Diferentes. Cada alternativa está definida de tal forma que es claramente diferenciable del resto.
- Excluyentes. La elección de una imposibilita la elección de cualquier otra.
- Exhaustivas. El conjunto definido constituye el universo de elección.

Estas características imposibilitan la elección de una alternativa mixta o de una alternativa que este fuera del conjunto de decisión.

(Certa, Galante, Lupo, & Passannanti, 2011) demuestran que eliminar alternativas que no son óptimos de Pareto es interesante para simplificar los procesos de toma de decisiones en ingeniería.

3.4. El método AHP. Breve descripción del método AHP.

El Proceso Analítico Jerárquico, cuyas siglas en inglés son AHP (Analytic Hierarchy Process) fue propuesto por el Profesor Thomas Saaty, de la Universidad de Pittsburgh, a finales de los años 70 (Saaty, 1980). Se basa en la idea de que la gran complejidad inherente a un

problema de toma de decisiones con criterios múltiples se puede resolver mediante la jerarquización de los problemas planteados. En AHP las relaciones entre los elementos de cada nivel son unidireccionales. El nivel superior de la jerarquía es el objetivo principal del problema de decisión (goal). Los niveles siguientes los forman los criterios tangibles o intangibles que contribuyen al objetivo. En el último nivel se sitúan las alternativas que se evaluarán según su contribución a cada uno de los criterios del nivel inmediatamente superior.

En cada nivel de la jerarquía, se realizan comparaciones pareadas entre los elementos que están en el mismo nivel, en base a la importancia o contribución de cada uno de ellos al vértice del nivel superior al que están ligados. Este proceso de comparación conduce a una escala de medida relativa de prioridades o pesos de los elementos. Las comparaciones pareadas se realizan por medio de ratios de preferencia (si se comparan alternativas) y ratios de importancia (si se comparan criterios), que se evalúan según una escala numérica propuesta por el método. El método permite analizar el grado de inconsistencia de los juicios del decisor. Detalles del método se pueden encontrar en ((Saaty, 1996) (Saaty, 1999). Los axiomas en los que Saaty fundamenta el método son:

- 1.- *Comparación Recíproca*: El Decisor debe ser capaz de realizar comparaciones y establecer la fuerza de sus preferencias. La intensidad de estas preferencias debe satisfacer la condición recíproca: Si A es x veces más preferido que B, entonces B es $1/x$ veces más preferido que A.
- 2.- *Homogeneidad*: Los elementos de una jerarquía deben ser comparables. Las preferencias se representan mediante una escala de comparabilidad limitada.
- 3.- *Independencia*: Cuando se expresan las preferencias, se asume que los criterios son independientes de las propiedades de las alternativas.
- 4.- *Expectativas*: Para el propósito de la toma de decisión, se asume que la jerarquía es completa. Todos los elementos (criterios y alternativas) del problema son tenidos en cuenta por el Decisor.

Los pasos del método son:

1. Modelizar el problema de decisión como una jerarquía. Este paso es esencial porque es el que permite a los responsables de la decisión analizar el problema, sus valores y sus sentimientos. Es
2. Realizar comparaciones por parejas en los elementos del mismo nivel, con la escala 1-9 de Saaty. Para cada nivel se obtiene una matriz de comparaciones pareadas A, con los juicios del decisor.
3. Obtener las prioridades locales de la matriz de comparación pareada A. Hay varios métodos para calcular las prioridades. La

propuesta original de (Saaty, 1980) es calcular el autovalor propio principal, en (Ishizaka & Labib, 2011) se puede ver un resumen de las opciones disponibles. Las prioridades obtenidas son locales al ser prioridades de los elementos en el mismo nivel de la jerarquía. Este paso se realiza, tanto para obtener los pesos de los criterios como para establecer las prioridades entre las alternativas para cada uno de los criterios.

4. Sintetizar las prioridades locales entre todos los criterios para determinar la prioridad global, multiplicando la prioridad local por la global del elemento del que depende.
5. Agregar las prioridades de las alternativas y de los criterios usando un modelo MCDM, normalmente se usa la suma ponderada en el AHP.

El método también calcula la inconsistencia de los juicios, mediante el ratio de consistencia (CR) de la matriz A.

$CR=CI/RI$ donde CI= es el máximo autovalor de A.

El índice aleatorio (RI, Random Index) es un valor experimental obtenido por (Saaty, 1994b). La Tabla 3 1 muestra los valores del RI. Si el CR es menos que un valor umbral entonces la matriz se puede considerar que tiene una consistencia aceptable y las prioridades derivadas de la matriz de comparación tienen sentido.

(Saaty, 1994b) propone los siguientes umbrales 0,05 , 0,08 y 0,1 para $n=2$, $n=3$ y $n>4$ respectivamente. Si el CR supera el valor umbral los juicios han de ser revisados por la falta de consistencia.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
RI	0	0	0.52	0.89	1.11	1.25	1.35	1.40	1.45	1.49	1.51	1.54

Tabla 3 1. Valores de RI

La siguiente Figura muestra un esquema del método AHP adaptado de (Aragonés-Beltrán, Chaparro-González, Pastor-Ferrando, & Pla-Rubio, 2014)

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

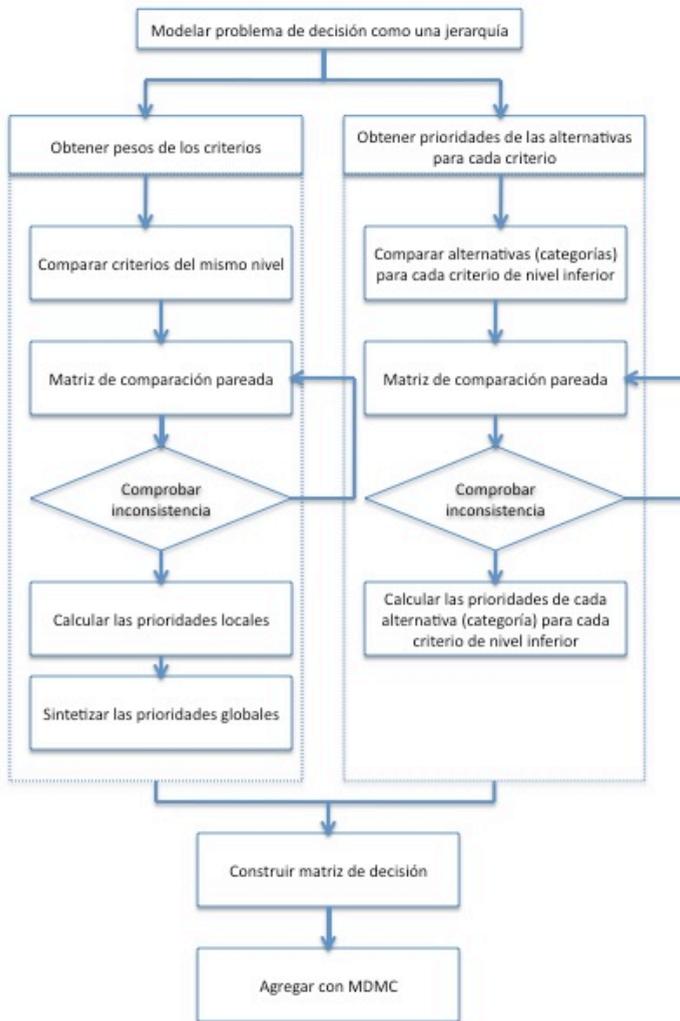


Figura 3 1 Esquema del método AHP. Adaptado de (Aragóns-Beltrán et al., 2014)

En la literatura actual existen numerosas referencias de aplicaciones de AHP a ámbitos de decisión muy diferentes. Una amplia revisión de las aplicaciones se puede encontrar en (Al-harbi, 2001), (Vaidya & Kumar, 2006) y (Sipahi & Timor, 2010).

El método AHP es conceptualmente fácil de usar; sin embargo, su estructura jerárquica no puede resolver la complejidad de muchos problemas reales. Como solución Saaty propuso el modelo ANP cuyos fundamentos básicos se exponen en el siguiente apartado.

3.5. El método ANP.

El método ANP es una generalización del AHP propuesta por el Profesor Thomas Saaty (Saaty, 2001, 2005) (Figueira et al., 2005). ANP presenta el problema de toma de decisiones como una red formada por elementos o nodos (en inglés “nodes”), que pueden ser alternativas y criterios de decisión, agrupados en grupos (en inglés “clusters”). Un elemento de un grupo en la red puede interactuar o tener influencia sobre algunos o todos los elementos de ese mismo grupo o de otros en la red. Se denomina realimentación a la relación que existe entre los elementos de un mismo grupo y se denomina interdependencia a la relación que existe entre elementos de distintos grupos. Estos conceptos se llaman también dependencia interna y externa, respectivamente.

En el método jerárquico AHP, las alternativas “influyen” sobre cada uno de los criterios de más bajo nivel y éstos sobre los del nivel inmediatamente superior del que cuelgan. Las relaciones en AHP son de prioridad o importancia, estableciendo el decisor sus “preferencias” para determinar la importancia de los criterios y el grado de satisfacción o preferencia de las alternativas respecto a cada criterio. Sin embargo, en ANP, todos los elementos de la red se pueden relacionar de alguna forma. Lo que se analiza en ANP es la intensidad de la “influencia” percibida de ciertos elementos (o grupos) de la red sobre otros elementos (o grupos), de forma que al final lo que se obtiene es un reparto de la influencia entre los elementos de toda la red, es decir, cuál es el porcentaje de influencia de un determinado elemento respecto al resto. Con esto se consigue un modelo que representa mejor la complejidad de los procesos reales de toma de decisión.

El diseño de la red que se haga en un problema de decisión es clave para hallar una solución adecuada, aunque no existen normas claras de como

diseñar la red que sean de aplicación general, (Saaty & Shih, 2009). La creación de la red suele ser el primero y uno de los más importantes pasos del método. Obliga al decisor y a su equipo a realizar un profundo análisis sobre el problema que debe afrontar y su complejidad. Generalmente, se suele llegar a un modelo de red complejo, después de haber analizado un problema con modelos más sencillos (tipo jerarquía, red única o subredes de costes y beneficios). Generalmente, al analizar un problema con los modelos más sencillos, el decisor se da cuenta que no reflejan toda la complejidad que necesita representar. Y esto se mostrará en el caso de estudio de esta tesis.

La influencia de los elementos en la red se representa mediante matrices, que tienen en filas y columnas los elementos del modelo y que se denominan supermatrices. Los fundamentos del método se pueden ver (T. L. Saaty, 2001) y (Saaty, 2005). los pasos del método son los extraídos de (Aragóns-Beltrán et al., 2014).

1 Identificar los componentes y elementos de la red y sus relaciones. Este paso se puede dividir en tres tareas básicas:

- (i) Identificar los elementos de la red (criterios de decisión y alternativas).
- (ii) Agrupar los elementos en componentes por alguna característica común.
- (iii) Analizar las relaciones entre elementos de la red.

2. Calcular las prioridades entre elementos de un mismo grupo. El objetivo de este paso es determinar entre los elementos de un grupo que influyen sobre un determinado elemento, cuál de ellos influye más y cuánto. Esto se realiza mediante comparaciones pareadas y cálculo del autovector asociado al autovalor principal.

3. Construir la supermatriz no ponderada. Este paso es el resultado del paso anterior. La supermatriz no ponderada (unweighted)

4. Calcular las prioridades entre grupos (clusters). Esto se realiza estableciendo matrices de comparación pareada entre grupos. Una matriz de comparación pareada entre grupos asociada a un grupo de la red dado es aquella cuyas filas y columnas están formadas por todos los grupos de la red que tienen influencia sobre dicho grupo dado.

5. Ponderación de los bloques de la supermatriz no ponderada, por las prioridades correspondientes de cada grupo, de forma que la supermatriz

resultante, supermatriz ponderada (weighted), sea estocástica por columnas.

6. Obtención de la supermatriz límite. Se obtiene elevando la supermatriz ponderada a sucesivas potencias hasta que sus entradas converjan.

La Figura 3 2, adaptada de (Aragón-Beltrán et al., 2014) muestra el esquema de los pasos descritos.

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

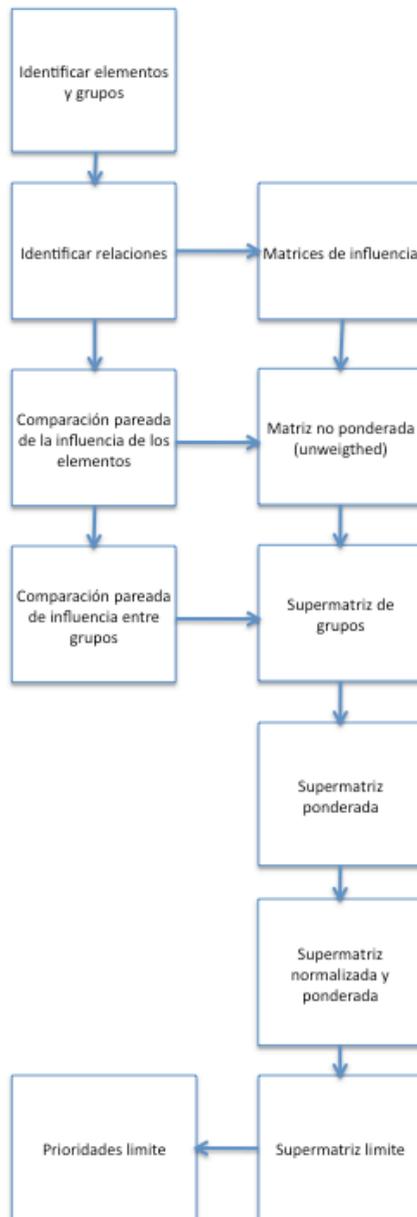


Figura 3 2 Esquema de los pasos del modelo. adaptada de (Aragónés-Beltrán et al., 2014)

A continuación se presenta la formalización matemática del método (Aragonés-Beltrán et al., 2014):

1. Dado un problema de decisión con x_1, x_2, \dots, x_N elementos, el primer paso es agrupar los elementos en c_1, c_2, \dots, c_G clusters o grupos.

Sea x_i^c el elemento i del modelo, que pertenece al cluster c , con $i = 1, \dots, N$, $c = 1, \dots, G$.

Sea x^{c_a} los elementos del cluster c_a , $\{x_i^c : c = c_a\}$.

Sea n_{c_a} el número de elementos del cluster c_a .

2. Identificar las relaciones entre elementos, preguntando al decisor, obteniendo la matriz de relaciones entre elementos, obteniendo la Matriz de Relaciones entre Elementos, de orden $(N \times N)$,

$$R = [r_{i,j}] = [r_{i,j}^{c_a, c_b}] \quad . \quad \text{Con } r_{i,j}^{c_a, c_b} \in \{0,1\}, \quad \text{dónde}$$

$$c_a, c_b = 1 \dots G \text{ y } i, j = 1 \dots N:$$

$r_{i,j}^{c_a, c_b} = 0$ indica que el elemento $x_i^{c_a}$ no influye sobre el elemento $x_j^{c_b}$, y en la representación gráfica del modelo no hay arco entre $x_i^{c_a}$ y $x_j^{c_b}$.

$r_{i,j}^{c_a, c_b} = 1$ indica que el elemento $x_i^{c_a}$ influye sobre el elemento $x_j^{c_b}$, y en la representación gráfica del modelo hay una flecha entre los elementos, que va de $x_j^{c_b}$ to $x_i^{c_a}$.

En la representación gráfica, las flechas se leen como “es influido por”.

3. Obtener la Matriz de Relaciones entre Clusters, de orden $(G \times G)$,

$$\hat{R} = [\hat{r}_{c_a, c_b}] \cdot \hat{r}_{c_a, c_b} \in \{0,1\} \text{ donde } c_a, c_b = 1 \dots G:$$

$\hat{r}_{c_a, c_b} = 0$, si ningún elemento del cluster c_a influye sobre ningún elemento del cluster c_b .

$$\hat{r}_{c_a, c_b} = 0 \rightarrow \forall i, j = 1, \dots, N : r_{i,j}^{c_a, c_b} = 0$$

$\hat{r}_{c_a, c_b} = 1$, si algún elemento del cluster c_a influye sobre algún elemento (al menos uno) del cluster c_b .

$$\hat{r}_{c_a, c_b} = 1 \rightarrow \exists i, j = 1, \dots, N : r_{i,j}^{c_a, c_b} = 1$$

4. Utilizar matrices de comparación de AHP para compararla influencia de los elementos que pertenecen a cada cluster, sobre cada uno de los elementos del modelo, obteniendo un vector de prioridad para cada matriz de comparación. De esta forma se obtiene la Supermatriz No Ponderada (NxN), $U = \left[u_{i,j}^{c_a, c_b} \right]$, con $u_{i,j}^{c_a, c_b} \in [0,1]$, $c_a, c_b = 1, \dots, G$ y $i, j = 1, \dots, N$, donde $u_{i,j}^{c_a, c_b}$ es la influencia del elemento i , que pertenece al cluster c_a , sobre el elemento j , que pertenece al cluster c_b .

$u_{i,j}^{c_a, c_b} = 0$ significa que el elemento i que pertenece al cluster c_a no influye sobre el elemento j que pertenece al cluster c_b .

$$u_{i,j}^{c_a, c_b} = 0 \leftrightarrow r_{i,j}^{c_a, c_b} = 0$$

$u_{i,j}^{c_a, c_b} = 1$ significa que el elemento i que pertenece al cluster c_a es el único elemento del cluster c_a que influye sobre el elemento j que pertenece al cluster c_b .

$$u_{i,j}^{c_a, c_b} = 1 \Rightarrow \forall k \neq i, \quad k = 1 \dots N : x_k \in c_a \rightarrow r_{k,j}^{c_a, c_b} = 0$$

Dado un cluster, c_a , y un elemento j que pertenece al cluster c_b , $x_j^{c_b}$, la suma de los valores de influencia de la supermatriz no ponderada de los elementos de c_a , que influyen sobre x_j es 1 o 0. Si ningún elemento de c_a influye sobre x_j entonces la suma es 0, en otro caso es 1.

$$\text{Dado } c_a, x_j^{c_b}$$

$$\sum_{\substack{k=1 \\ k: x_k \in c_a}}^N (u_{k,j}^{c_a, c_b}) \in \{0,1\}$$

La suma por columnas de la Supermatriz No Ponderada, $\sum_{i=1}^N (u_{i,j})$, indica cuántos grupos influyen sobre el elemento de la columna.

5. Comparar la influencia entre clusters, obteniendo la matriz de orden $(G \times G)$ de pesos de Clusters $\hat{U} = [\hat{u}_{c_\alpha c_\beta}]$, con $\hat{u}_{c_\alpha c_\beta} \in [0,1]$, $c_\alpha, c_\beta = 1, \dots, G$, donde $\hat{u}_{c_\alpha c_\beta}$ es la influencia del cluster c_α sobre el cluster c_β .

$\hat{u}_{c_\alpha c_\beta} = 0$, indica que ningún elemento del cluster c_α influye sobre ningún elemento del cluster c_β .

$$\sum_{c_\alpha=1}^G (\hat{u}_{c_\alpha c_\beta}) = 1.$$

6. Calcular la Supermatriz Ponderada $(N \times N)$, $W = [w_{i,j}^{c_\alpha c_\beta}]$, con

$$w_{i,j}^{c_\alpha c_\beta} \in [0,1], c_\alpha, c_\beta = 1, \dots, G \text{ y } i, j = 1, \dots, N, \quad \text{dónde}$$

$$w_{i,j}^{c_\alpha c_\beta} = u_{i,j}^{c_\alpha c_\beta} \cdot \hat{u}_{c_\alpha c_\beta}.$$

$w_{i,j}^{c_\alpha c_\beta}$ es la influencia ponderada del elemento i , que pertenece al cluster c_α , sobre el elemento j , que pertenece al cluster c_β .

$$\sum_{i=1}^N (w_{i,j}^{c_\alpha c_\beta}) \in]0,1]$$

7. Calcular $Q = [q_{i,j}^{c_\alpha c_\beta}]$ la Supermatriz Ponderada y Normalizada, de orden $(N \times N)$, con $q_{i,j}^{c_\alpha c_\beta} \in [0,1]$, $c_\alpha, c_\beta = 1, \dots, G$ y

$$i, j = 1, \dots, N, \text{ donde } q_{i,j}^{c_\alpha c_\beta} = \frac{w_{i,j}^{c_\alpha c_\beta}}{\sum_i (w_{i,j}^{c_\alpha c_\beta})}.$$

$q_{i,j}^{c_\alpha c_\beta}$ es la influencia ponderada normalizada del elemento i , que pertenece al cluster c_α , sobre el elemento j , que pertenece al cluster c_β .

$$\sum_i (q_{i,j}^{c_\alpha c_\beta}) = 1. \quad Q \text{ es una matriz estocástica por la izquierda.}$$

8. Elevar la Supermatriz Ponderada y Normalizada a sucesivas potencias hasta que converja el resultado, obteniendo la Supermatriz Límite $L = \lim_{k \rightarrow \infty} Q^k$. l_i es la prioridad final del elemento x_i . Si x_i es una alternativa, l_i es la puntuación de la alternativa. Si x_i es un criterio, l_i es el peso del criterio.

La parte fundamental del método ANP es la correcta creación de la red, ya que si la red no está suficientemente relacionada la matriz no es estocástica por columnas y no se puede aplicar el método, al no converger a una solución única.

3.6. Valoración de alternativas mediante “Ratings”

A continuación se expone el procedimiento de valoración de alternativas, denominado “ratings”, que el autor de AHP y ANP propone cuando el número de alternativas a evaluar es muy numeroso. Este procedimiento se basa en, para cada criterio, comparar cada alternativa, independientemente de las demás, respecto a un ideal o estándar. Se asume que las alternativas son independientes entre sí y que la prioridad final obtenida se ha de mantener, es decir, la aparición o desaparición de una alternativa durante el proceso de evaluación no afecta a las prioridades del resto. Cuando se evalúan las alternativas para un determinado criterio mediante comparación pareada, se asume que son dependientes entre sí y que la prioridad final puede no mantenerse (Saaty, 2006).

Como se explica en (Saaty, 2006), los ratings o categorías, son unos niveles de intensidad o grados de valoración de la preferencia de un determinado criterio, por ejemplo: excelente, bueno, normal, bajo o muy bajo. A continuación, se establece una prioridad entre las categorías mediante comparaciones pareadas, de modo similar a como se obtienen las prioridades en el método AHP. Las prioridades obtenidas en modo distributivo se normalizan al ideal, dividiendo cada prioridad por la mayor. Por ejemplo, la categoría excelente obtendría el valor 1 (que sería el ideal en este caso) y el resto de categorías obtendrían una prioridad proporcionalmente menor. Idealizar estas prioridades al dividir por el mayor asegura que las intensidades de las categorías que pertenezcan a criterios que tienen muchas categorías no se vean afectadas en comparación con las intensidades de las categorías de los criterios que

tienen menos, ya que, por ejemplo, no es lo mismo repartir preferencias entre 5 elementos que entre 3.

Una vez establecidas, para cada criterio, sus categorías y las valoraciones de las mismas, las alternativas se valoran respecto a cada criterio, comparándolas con los respectivos ideales y asignándoles los ratings correspondientes. Esto supone que para cada criterio, las alternativas se clasifican según las categorías asociadas. Por ejemplo la cualificación profesional de un candidato a un puesto de trabajo puede ser excelente o muy baja. De esta forma a cada alternativa se le asigna el valor, para cada criterio, que corresponde con la prioridad de su respectiva categoría que le haya sido asignada en la evaluación

Como ya se ha comentado anteriormente, la ventaja de este procedimiento es que la inclusión o exclusión de nuevas alternativas no genera cambios en la ordenación previa, permite incluir muchas más alternativas y en general no presenta problemas de inversión de rango por alternativas irrelevantes.

La decisión del tipo de clasificación se debe realizar a priori y depende del tipo de problema que se esté modelando (Saaty & Sagir, 2009). (Millet & Saaty, 2000) describen las particularidades de cada sistema de medición y clasificación y su aplicación en función del problema de decisión.

En esta tesis, debido al elevado número de alternativas existentes se ha optado por valorar las alternativas, respecto a cada criterio, utilizando la técnica de los Ratings. Se ha asumido que las alternativas planteadas, a priori, son independientes unas de otras.

3.7. El método ANP/BOCR.

El método ANP BOCR (Beneficios, Oportunidades, Costes y Riesgos) es un modelo del método método ANP sugerido por (Saaty, 2005) para los casos en los que existan varios conjuntos de criterios a maximizar o minimizar y no sean fácilmente agrupables en una única red.

Este método consiste en generar una jerarquía, llamada jerarquía de control, en la que se incluyan las cuatro redes definidas (denominadas subredes), la subred de beneficios, la de costes, la de oportunidades y la de riesgos.

Cada una de estas subredes incluye sus grupos de criterios y alternativas, fuertemente relacionadas entre sí. De esta forma resulta más fácil de integrar criterios muy dispares y, variando el peso de cada subred dentro de la jerarquía, se puede obtener una priorización particularizada para las condiciones particulares de aversión al riesgo o al coste de los decisores.

(Saaty & Vargas, 1998) describen el método ANP con BOCR como el método que permite integrar las propiedades de cualquier problema de toma de decisiones, ya que todas las decisiones tienen varios puntos a favor y en contra, algunos son seguros y otros solo son posibles y tienen una posibilidad limitada de materializarse. Los factores seguros y positivos se les llama beneficios y a los negativos costes. Los factores posibles de una decisión con resultado positivo son oportunidades y los negativos son los riesgos. Cada uno de estos cuatro factores utiliza una estructura separada para la decisión, comenzando con la estructura de control de beneficios y la red de dependencias que se forma para cada criterio de control de beneficios y terminando con la estructura de control de riesgos.

(Saaty & Vargas, 1998) se refieren colectivamente a los cuatro factores como méritos BOCR, usándose las iniciales de los positivos (Beneficios y Oportunidades) primero y las de los negativos después (Costes y Riesgos). Cada uno de estos factores contribuye al mérito de la decisión y debe de ser evaluado de forma independiente dentro de un conjunto de criterios que se usan para evaluar cualquier decisión. A estas evaluaciones se les llama méritos y a los criterios de evaluación se les llama criterios estratégicos. Algunos ejemplos de criterios estratégicos pueden ser: Satisfacción, felicidad, conveniencia, orden, armonía, paz, poder, eficiencia, utilidad social, progreso, riqueza, etc. Estos deben ser asimismo priorizados para uso frecuente en todas las decisiones. De esta manera podemos sintetizar el resultado de las alternativas para cada estructura BOCR, para obtener la síntesis general. Es de destacar que los costes y los riesgos son a “minimizar”, es decir, son mejores las alternativas con “menos costes y menos riesgos”. Este aspecto se ha de tener en cuenta a la hora de analizar las influencias y de agregar las subredes.

(Saaty, 2005) analizan varias formas de agregar las subredes BOCR. Un modo muy habitual es usar la agregación BO/CR, pero en este caso las medidas relativas de beneficios y oportunidades deben ser comparables con los costes y los riesgos. Otra forma de agregar es mediante la expresión $bB+oO-cC-rR$, donde b, o, c y r son las ponderaciones que se asignen a cada subred. Estas prioridades b, o, c y r se obtienen

comparando B, O, C y R de forma individual frente a los criterios estratégicos en función de las aplicaciones.

3.8. Evaluación multicriterio de proyectos en el ámbito ferroviario.

La evaluación multicriterio está extendida en el sector ferroviario, utilizándose en varios ámbitos y diversas escalas. La mayor parte de la investigación realizada en análisis multicriterio en ferrocarriles en los últimos años ha tenido dos grandes campos:

- Localización de instalaciones: elección de alternativas de construcción, (Hyun, 2005), (Gerçek et al., 2004), selección de método de transporte (FFCC, metro, autobús), (Tudela, Akiki, & Cisternas, 2006), Priorización entre diversos proyectos. (Özkır & Demirel, 2012), (Shelton & Medina, 2010).
- Mejora de la operatividad, gestión de flotas y satisfacción de los clientes. (Sohn, 2008), (Yedla & Shrestha, 2003)

En el ámbito ferroviario es habitual la gestión por proyectos, tanto en la construcción de nuevas líneas como también proyectos de rehabilitación y mejora, de cambios de procedimientos, de implementación de nuevas tecnologías y casi cualquier tipo de proyecto que se pueda considerar de forma general, no siendo los de construcción de obra nueva los mas numerosos.

Para la evaluación de proyectos se han utilizado desde hace mucho tiempo las técnicas de análisis Coste-Beneficio, (Damart & Roy, 2009) o (Salling & Banister, 2009), (Tudela et al., 2006), siendo esta aplicación uno de los ámbitos clásicos de aplicación, dentro del conjunto de evaluación de proyectos de transporte. Solo a nivel España podemos citar a (de Rus & Inglada, 1997), (de Rus et al., 2009), (Mendoza et al., 2006), (Coto-Millán, 2011) donde evalúan desde diferentes puntos de vista las líneas de alta velocidad en España, tanto de forma previa como posterior a la construcción.

Ya como uso de técnicas multicriterio, (Ahern & Anandarajah, 2007) usan programación por metas para priorizar una lista de proyectos desarrollada por el departamento de transporte de Irlanda. (Arslan, 2008) usa un modelo mixto Fuzzy AHP para evaluación de proyectos de

transporte, (Nyström & Söderholm, 2010) usan AHP para evaluar acciones de mantenimiento correctivo en Ferrocarriles. (Tsamboulas, 2007), selecciona grandes proyectos internacionales de transporte ferroviario, (Gandibleux, Riteau, & Delorme, 2008) usan el método lexicográfico para priorizar los diferentes criterios a la hora de ajustar la planificación de la malla de movimientos de una red ferroviaria, (Sayers, Jessop, & Hills, 2003) usan la suma ponderada para integrar todos los criterios definidos como fundamentales por el sistema británico de evaluación de proyectos de transporte. (Karydas and Gifun, 2006) usan AHP y MAUT para la priorización de renovación de infraestructuras.

El enfoque de esta tesis no se centra en esos temas, sino que, sobre una infraestructura dada se analizan, con un enfoque multicriterio, los proyectos de MR&I que son más deseables para mejorar el desempeño de la infraestructura. Ante la separación en 2005 de la operación de los trenes de la gestión de la infraestructura en España, por la ley del sector ferroviario, este enfoque es el que consideramos ha de tomar el gestor de la red a la hora de realizar las actuaciones sobre la red existente.

Se han realizado análisis del proceso de mantenimiento ferroviario, tanto desde el enfoque multicriterio como desde enfoques de función de utilidad, principalmente para optimizar las funciones de mantenimiento periódico de la infraestructura (Value at risk) (Seyedshohadaie et al., 2010), pero siempre sobre actividades de mantenimiento basadas en parámetros con cambios medibles en el tiempo, principalmente valores geométricos, como son el desgaste de hilo de contacto, ancho de vía, asentamiento de la plataforma, etc...

Este enfoque, aunque muy interesante y eficaz en su campo de aplicación, no es generalizable a la totalidad de las instalaciones ni permite el estudio integrado de las características de una instalación.

Consideramos que ante la gran cantidad de variables a controlar y tener una interrelación muy fuerte, es imposible construir una función de utilidad lógica y sencilla que nos permita realizar un análisis integral del estado de la red.

El estudio de los proyectos de actuaciones de mejora nos permite, dentro del ámbito de los proyectos menores (dentro de lo que son los proyectos ferroviarios) cribar de una forma eficaz los proyectos que tendrán menor repercusión sobre la funcionalidad de la instalación y seleccionar una cartera de proyectos a implementar donde los proyectos seleccionados tendrán un gran efecto sobre las capacidades de la red.

(Dağdeviren & Eraslan, 2008) proponen un modelo ANP para priorizar la política energética estratégica compuesto de los siguientes pasos, trasladables a caso de infraestructuras ferroviarias:

1. Creación del grupo de expertos.
2. Generar la jerarquía de control y los criterios estratégicos. La jerarquía de control se estructura de forma que el objetivo es el primer nivel, los criterios estratégicos son los segundos y los BOCR están en el tercer nivel.
3. Generar subredes de BOCR. Los criterios BOCR y las políticas estratégicas de energía se incluyen en las subredes. Las relaciones entre los grupos se muestran en estas subredes.

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

Capítulo 4

Propuesta de modelos de selección de cartera de proyectos de MR&I ferroviario basado en AHP/ANP

4.1. Proceso de toma de decisiones

En el trabajo realizado en esta tesis se ha seguido el proceso de toma de decisiones que se muestra en la Figura 4 1

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

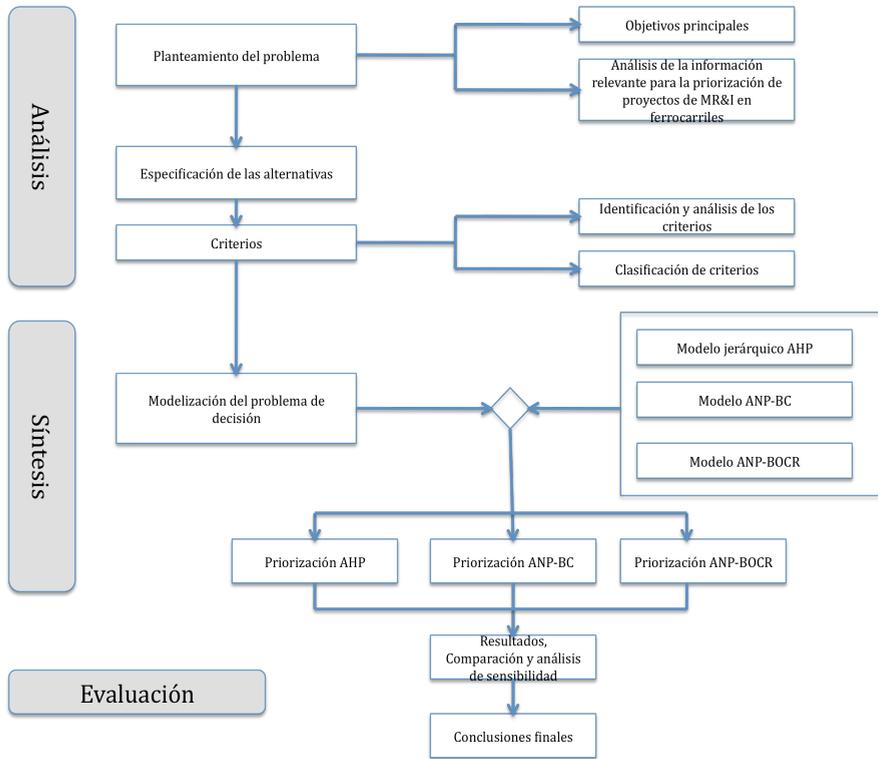


Figura 4 1 Proceso de decisión

Este proceso se ha estructurado en tres fases: Análisis del problema, Síntesis y evaluación. Durante este proceso se han generado tres modelos de ayuda a la decisión diferentes: un modelo jerárquico (AHP) y dos modelos en red ANP; uno basado en dos subredes de Coste y Beneficio y otro basado en cuatro subredes de Beneficios, Oportunidades, Costes y riesgos (BOCR). Los tres modelos se han basado en un análisis previo común de alternativas y de criterios.

El modelo ANP-BOCR se ha desarrollado al aumentar la experiencia del decisor en el proceso y al detectar puntos en los que el modelo no conseguía capturar toda la información de forma adecuada.

4.2. Formulación del problema.

El caso de estudio que se plantea en esta tesis es la ordenación de una cartera muy numerosa de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora (MR&I) de la infraestructura ferroviaria de una determinada zona, teniendo en cuenta todos los criterios necesarios, con un coste de evaluación de los proyectos reducido. El problema que tienen los gestores locales es seleccionar qué proyectos de MR&I se deben ejecutar primero

La decisión de realizar actuaciones de mejora en ADIF está centralizada, pero las propuestas parten de los gestores locales de cada ámbito.

La metodología habitual de selección de las actuaciones a desarrollar no tiene un procedimiento establecido formalmente. La selección se basa en la experiencia de los técnicos y gestores y en la disponibilidad presupuestaria para actuaciones de libre elección por parte de ADIF. Es habitual que las propuestas de proyectos se envíen de forma ordenada por los gestores, pero sin valoraciones cardinales y sin explicitar el fundamento de la ordenación ni las valoraciones respecto a los criterios considerados.

La gestión del mantenimiento de ADIF se lleva a cabo desde Gerencias distribuidas por el territorio, existiendo 18 Gerencias de Mantenimiento en todo el territorio nacional en el momento de elaboración de esta tesis.

Este trabajo se ha centrado en el ámbito de la gerencia de mantenimiento de Valencia, que se extiende por las provincias de Valencia, Castellón, Teruel y parte de Tarragona, según se puede ver en la Figura 4 2. La zona seleccionada para el caso de estudio es amplia e incluye diferentes tipos de línea y varios tipos de infraestructura, desde líneas no electrificadas con señalización electromecánica a líneas de velocidad alta (220 km/h) con altas prestaciones. Los niveles de tráfico de las diferentes líneas son dispares. La falta de homogeneidad entre las posibles actuaciones hace que la decisión sobre cuáles de ellas ejecutar primero sea más compleja.

Se ha seleccionado esta Zona por las siguientes razones:

- El autor trabajaba en esa gerencia y tiene fácil acceso a toda la documentación técnica requerida.

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

- El autor conoce las instalaciones y es capaz de proponer y evaluar las actuaciones posibles en este ámbito.
- El gerente se ha prestado para realizar la función de decisor para priorizar los criterios y categorías.
- Es una muestra lo suficientemente grande y variada como para poder extrapolar resultados a toda la red ferroviaria.

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

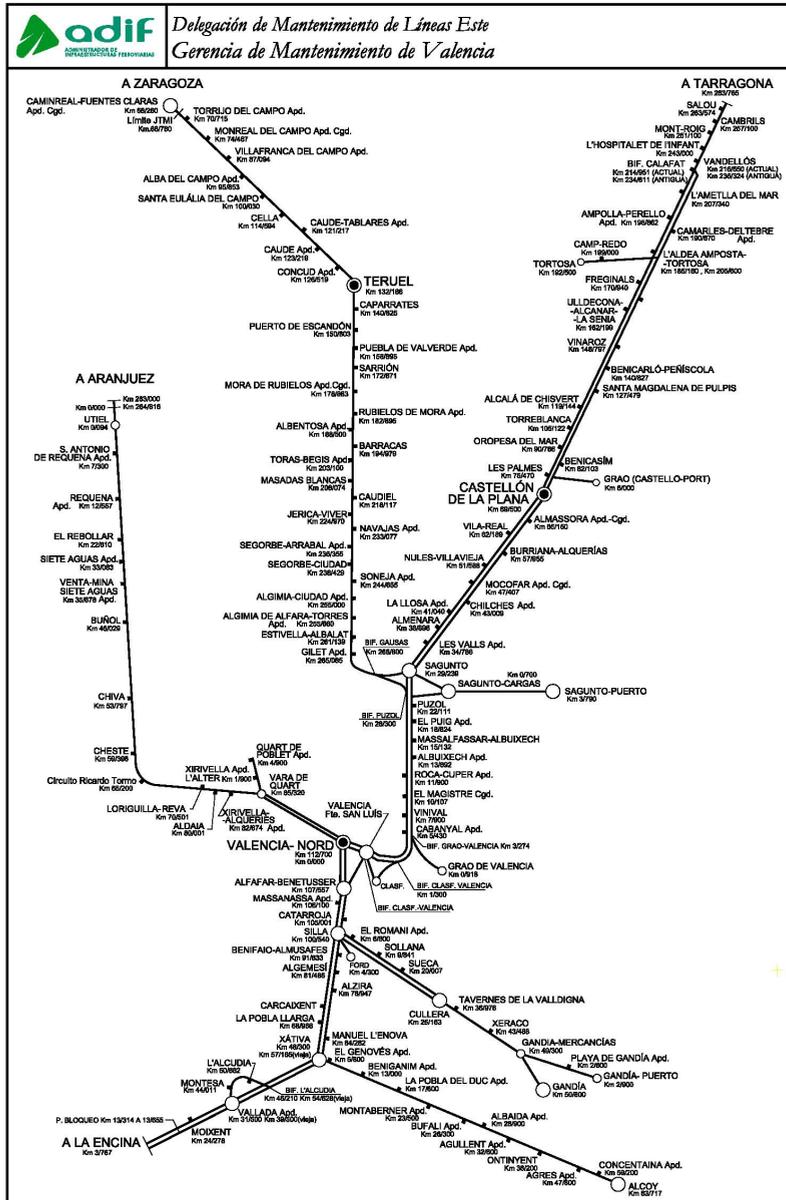


Figura 4 2 Ámbito de la Gerencia de mantenimiento de Valencia (ADIF)

El número de proyectos de actuaciones de mejora posibles siempre es mayor que los recursos disponibles para ejecutarlos, siendo además muchas veces incompatibles entre sí, por lo que es necesario algún sistema de selección entre ellos. La amplia cartera de proyectos existente se ha convertido en un programa de proyectos priorizado, más manejable que un listado de proyectos aislados, en la que todos los proyectos estén alineados con los objetivos comunes del programa.

El problema de priorización es complejo por la existencia de múltiples factores que afectan a la idoneidad de los proyectos (Ding-Zhu, 2009), como son:

- Múltiples criterios a considerar.
- Criterios objetivos y subjetivos.
- No se ha encontrado una función de utilidad que lo registre todo objetivamente y que sea lo suficientemente genérica para reflejar todos los proyectos.
- Cartera de proyectos discreta pero muy extensa.
- Múltiples zonas de actuación de los proyectos.

La selección de una cartera de proyectos de MR&I depende tanto del tipo de trabajo que haya que realizar como de su ámbito de aplicación, siendo la idoneidad muy diferente según la zona de implantación. Los proyectos están sujetos a incertidumbres de costo, plazo y calidad en su ejecución e implementación (Giezen, 2012). La utilidad o satisfacción de los criterios una vez realizados también es variable, aun en los criterios cuantitativos estimados en base a proyectos similares o previsiones (Flyvbjerg, 2007a).

Los proyectos de MR&I que se han de evaluar solo están diseñados a nivel de estudios preliminares o diseño básico, ya que el coste de hacer el estudio de detalle es muy alto para esta fase de decisión y la precisión de la información no mejora significativamente la calidad de la evaluación, sin eliminar completamente las incertidumbres, ya que estas dependen en gran parte de factores externos no controlables por el gestor de la instalación.

Las condiciones de contorno de la infraestructura también son cambiantes, ya que por ejemplo, los niveles de uso de la infraestructura por parte de los operadores van cambiando. Además hay que tener en cuenta la influencia de los proyectos MR&I que se vayan implantando, tanto por el área de mantenimiento de la Empresa como por otros actores del sector ferroviario. Esto impide que la ordenación de proyectos MR&I sea estable y por tanto, las prioridades obtenidas cambian a medida que pasa el tiempo y se van ejecutando los proyectos seleccionados. Debido a lo anterior no solo es necesario diseñar un sistema que permita priorizar

los proyectos entre sí, sino que ha de ser lo suficientemente ágil como para que se puedan hacer análisis periódicos de los proyectos MR&I en cada ciclo de inversión (normalmente anuales o bianuales). Un sistema de ayuda a la decisión muy detallado y con alto coste de análisis, que necesitará de un tiempo de análisis muy largo no sería efectivo, ya que los resultados quedarían obsoletos rápidamente y no se tendría la certeza de priorizar de acuerdo a las necesidades actuales. Todo el proceso de recopilación de datos, análisis de los proyectos y agregación multicriterio, para ser efectiva, ha de ser mucho más rápido que el ciclo de inversión.

El presente estudio se llevó a cabo por el Gestor Local de la Gerencia de Valencia junto con uno de los técnicos de su departamento (y autor de esta tesis) que actuaron como decisores (DM) por consenso, con la asistencia de dos miembros del equipo de investigación del Departamento de Proyectos de Ingeniería de la Universidad Politécnica de Valencia, que interpretó el papel de Analysis Team (AT). El Gestor Local estaba interesado disponer de una herramienta metodológica científicamente probada para ayudarle a establecer una prioridad en los proyectos de MR&I y justificar sus recomendaciones. La Figura 4-1 muestra el proceso de toma de decisiones seguido en esta tesis.

4.3. Identificación de las alternativas.

Las alternativas del caso de estudio son todas las actuaciones de MR&I detectados por los técnicos durante un periodo de tiempo concreto y que responden a las necesidades surgidas por el funcionamiento de la red. Las actuaciones posibles son mejoras, sustituciones o renovaciones de las infraestructuras y/o instalaciones existentes en los tramos. Las actuaciones que se van a evaluar van a ser proyectos en fase de Diseño Básico. Una vez seleccionadas aquellas actuaciones prioritarias, se deberá desarrollar para cada una los correspondientes proyectos de ejecución.

Los técnicos de la Compañía detectaron 24 acciones tipo que se suelen realizar sobre cada tramo de línea. Tabla 4 1.

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

ACCIONES TIPO	
A	Renovación de vía con carril UIC-60 y traviesa de hormigón.
B	Renovación de vía con carril UIC-54 y traviesa RS.
C	Renovación de vía con carril UIC-54 y traviesa de hormigón.
D	Duplicación de vía
E	Sustitución de desvíos A por B.
F	Sustitución de desvíos B por C.
G	Sustitución de desvíos A por C.
H	Tratamiento de Infraestructura
I	Renovación de catenaria con tipo CR220
J	Renovación de catenaria con tipo CR160
K	Sistema de control distribuido en SSEE
L	Telemando de subestaciones
M	Construcción de nueva subestación.
N	Sustitución de enc. por enclavamiento electrónico y CdV de Audiofrecuencia
O	Cambio de bloqueo eléctrico por electrónico
P	Reducción del cantón crítico y construcción de Puesto de bloqueo.
Q	Cambio de bloqueo de BLAU a BAU
R	Cambio de bloqueo de BAD a BAB
S	Cambio de bloqueo de BT a BLAU
T	Cambio de bloqueo de BT a BAU
U	Cambio de bloqueo de BT a BAD
V	Cambio de bloqueo de BT a BAB
X	Supresión de paso a nivel
Y	Instalación de Tren-Tierra

Tabla 4 1 Acciones Tipo

Como en la Zona de Valencia hay 34 tramos de línea Tabla 4 2, el número total de actuaciones posibles fueron 816. De estas actuaciones, muchas de ellas no eran directamente aplicables sobre ciertos tramos. Por ejemplo, si una actuación tipo era eliminar pasos a nivel, se observó que 10 tramos no tenían pasos a nivel, lo cual eliminaba 10 posibles alternativas. Tras un análisis exhaustivo de acciones tipo y tramos específicos, se identificaron 419 posibles actuaciones. Estas actuaciones

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

constituyen una cartera de proyectos, ya que, según la definición de la ISO 21500:2012: “una cartera de proyectos es un conjunto de proyectos, programas y otro tipo de trabajos que se agrupan para facilitar la gestión eficaz de dicho trabajo de modo que se cumplan las metas estratégicas. En este caso la meta estratégica es mantener la red en el mejor funcionamiento posible”. Las actuaciones alternativas son muy diferentes entre sí y cumplen diferentes objetivos. Por ejemplo la actuación 30850J consiste en la renovación de la línea aérea de contacto tipo CR-220 (actuación tipo J) en la línea 30850 (Játiva-Silla).

CÓDIGO DE LÍNEA	LINEA
30750	FUENTE DE LA HIGUERA - MOGENTE
30800	MOGENTE - JATIVA
30802	BIF.VALLADA - BIF.L ALCUDIA
30850	JATIVA - SILLA
30851	SILLA - FACTORIA FORD
30900	SILLA - VALENCIA TERMINO
30902	ALFAFAR-BENETUSSER - VALENCIA-FUENTE SAN LUIS
30950	VALENCIA TERMINO - SAGUNTO
30951	VALENCIA-FUENTE SAN LUIS - CLASIF.VALENCIA FTE.S.LUIS
30953	BIF.CLAS.VALENCIA FTE.S.LUIS - CLASIF.VALENCIA FTE.S.LUIS
30957	SAGUNTO - PUERTO DE SAGUNTO
31000	SAGUNTO - ALMENARA
31050	ALMENARA - CASTELLON DE LA PLANA
31100	CASTELLON DE LA PLANA - OROPESA DEL MAR
31101	LAS PALMAS - CASTELLON PUERTO
31150	OROPESA DEL MAR - VINAROS
31200	VINAROS - ULLDECONA
31250	ULLDECONA - L ALDEA AMPOSTA

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

31251	L ALDEA AMPOSTA - TORTOSA
31300	L ALDEA AMPOSTA - SALOU
32150	CAMPORROBLES - UTIEL
32300	UTIEL - BUNOL
32350	BUNOL - VARA DE QUART
32500	VARA DE QUART - QUART DE POBLET
33600	JATIVA - ONTENIENTE
33650	ONTENIENTE - ALCOY
33800	SILLA - GANDIA
33801	GANDIA MERCANCIAS - GANDIA PUERTO
34200	SAGUNT - SONEJA
34250	SONEJA - CAUDIEL
22400	BADULES - SANTA EULALIA DEL CAMPO
22450	SANTA EULALIA DEL CAMPO - TERUEL
22500	TERUEL - BARRACAS
22550	BARRACAS - CAUDIEL

Tabla 4 2 Líneas

Uno de los problemas que se plantean en esta tesis es que la cartera de proyectos es muy amplia. El nivel de detalle de los proyectos planteados como alternativas no es alto porque el coste de realizar proyectos de detalle de un número tan alto de alternativas no es abordable. Por ello, la selección de los proyectos que se deban abordar prioritariamente se tiene que realizar mediante criterios cualitativos, en su mayoría. Si en el momento de realizar los proyectos de ejecución de las alternativas elegidas, algún parámetro se desviase demasiado de las previsiones iniciales, habría que reconsiderar su prioridad respecto del grupo de proyectos seleccionados.

El uso de categorías para clasificar las alternativas nos ha permitido hacer una sola valoración de las actuaciones y que está sea independiente del modelo empleado. Si no se hubieran usado categorías hubiera sido necesario revalorar las alternativas en cada nueva versión del modelo.

Un técnico cualificado, buen conocedor de la zona que tiene que mantener, es capaz de evaluar las actuaciones propuestas en fase de diseño básico. Esto lo puede realizar en un tiempo breve y con la precisión necesaria para que la evaluación sea adecuada, si dispone de la información suficiente sobre la zona y el alcance de cada una de las actuaciones, conociendo los criterios de evaluación y la forma de evaluar las alternativas. Esta facilidad permite analizar un listado de proyectos lo más exhaustivo posible y detectar proyectos interesantes que se podrían haber descartado inicialmente.

Dentro de las alternativas posibles no se han incluido proyectos de instalación de prototipos, equipos de pruebas o instalaciones no probadas anteriormente. El tipo de actuaciones consideradas son instalaciones maduras, ya validadas por el uso y la experiencia técnica y cuyas incertidumbres no se basan en problemas tecnológicos sino en la complejidad propia de cualquier proyecto de construcción y sobre todo de como se ve modificado el conjunto del sistema de transporte ferroviario por la realización del proyecto. De esta forma no se está expuesto a los problemas inherentes de usar tecnologías innovadoras, con consecuencias desconocidas (Sommer & Loch, 2004) y se puede usar con facilidad el pronóstico por clase de referencia como expone (Flyvbjerg, 2009) para estimar los costes y resultados del proyecto, es decir, basarnos en los resultados obtenidos por los proyectos previos para evaluar los nuevos.

El pronóstico por clase de referencia requiere los siguientes pasos para cada proyecto, basado en (Flyvbjerg, 2009):

- Identificación de la clase de referencia relevante de proyectos anteriores. Esta clase ha de ser suficientemente amplia para ser estadísticamente significativa pero lo suficientemente específica para que los proyectos sean realmente comparables con el caso de estudio.
- Establecer una distribución de probabilidad para la clase de referencia seleccionada. Para ello se requiere acceso a datos empíricos y creíbles de los suficientes proyectos de la clase de referencia para adoptar conclusiones con relevancia estadística.
- Comparar el proyecto específico con la distribución de la clase de referencia, para obtener el resultado más probable del proyecto en cuestión.

Los proyectos excluidos de este análisis no se pueden considerar actuaciones de mejora y tienen otros condicionantes que hacen que no sean comparables con el conjunto de actuaciones identificadas, sin

distorsionar el modelo. Además dentro de la estructura de ADIF y de casi todas las empresas del sector ferroviario, ese tipo de proyectos no los realizan las divisiones de mantenimiento sino que son equipos independientes de I+D o ingeniería a nivel central. Un ejemplo de proyectos que no se incluiría en las actuaciones alternativas puede ser la implantación de sistemas de supervisión de desvíos.

Se ha trabajado sobre un grupo de 419 actuaciones alternativas, aun sabiendo que muchas de ellas serán poco prioritarias. Se ha realizado así para probar la potencia del modelo desarrollado y además, poder comparar la prioridad que le daría el decisor a cada actuación de forma directa y la que se obtiene con el sistema de ayuda a la decisión planteado. En futuras aplicaciones podría ser posible hacer una preselección de proyectos pero para este trabajo se ha decidido dejar el listado completo. No se tiene conocimiento de que se haya realizado nunca a un nivel territorial tan pequeño un estudio de priorización tan exhaustivo.

Las actuaciones alternativas no son completamente compatibles entre sí. Por la propia naturaleza de las actuaciones que se realizan, muchas son excluyentes sobre una misma línea. Por ello, una vez se realice la priorización de todo el conjunto de actuaciones, se eliminarán del listado aquellas que sean incompatibles con actuaciones previas de mayor prioridad. Esta tarea se ha de realizar una vez priorizadas las alternativas, ya que la alternativa eliminada depende de las prioridades relativas con otras actuaciones, no existiendo alternativas que no sean Pareto eficientes. Por ejemplo, si se realiza una renovación de la línea aérea de contacto tipo CR220, no tiene sentido sustituirla posteriormente por CR160 al ser un sistema inferior en cuanto a prestaciones.

El listado de actuaciones consideradas con sus valoraciones se incluye en el anexo 4.

De cara a los análisis de sensibilidad y a representar determinados gráficos se ha seleccionado un subgrupo de 24 alternativas, de todo el rango de la cartera, para que la evaluación sea visiblemente más sencilla, pero la priorización se ha realizado con todo el conjunto de alternativas considerado.

4.4. Identificación y agrupación de los criterios de decisión.

La identificación de los criterios se basa en la experiencia del decisor y en la revisión de la literatura existente sobre toma de decisiones en proyectos de infraestructura de transporte. (Tsamboulas, 2007) analiza el coste económico, el retorno de la inversión, la eliminación de los cuellos de botella y efectos medioambientales, políticos y de interoperabilidad; (Gerçek et al., 2004) proponen 4 grupos de criterios: Financieros, que son los costes financieros del operador (costes de operación y mantenimiento, costes de infraestructura y el coste de los vehículos), Económicos que son costes sociales de todos los actores y no sólo del operador ferroviario (coste de operación de los vehículos de carretera, compra de vehículos de carretera, coste de los accidentes de tráfico, coste de los accidente, tiempos de viaje y costes ambientales), Planificación (Capacidad del sistema, accesibilidad, integración y adecuación al plan general) y Políticos (coste de expropiación, tiempo de construcción, etc.). (Ahern & Anandarajah, 2007) estudiaron los beneficios para los usuarios de mejorar los servicios de transporte público, las conexiones entre los principales núcleos de población, desarrollo regional equilibrado, impacto ambiental reducido y transparencia en la selección de proyectos usando programación por metas.

Además de estos criterios, se analizaron los objetivos fijados por la compañía para la gestión y administración de la red, incluyendo su misión, visión y valores explícitos.

También se estudiaron otros criterios descritos en la literatura técnica pero no se incluyeron en el modelo por salirse del alcance del tipo de proyectos considerado, aunque pueden ser útiles en problemas similares. (Brons, Givoni, & Rietveld, 2009) estudiaron la importancia de aumentar el número de estaciones para aumentar el número de pasajeros; (Thomas, Rhind, & Robinson, 2005) estudia los factores que aumentan la sensación de seguridad de los pasajeros en los andenes; (Ieda, Kanayama, Ota, Yamazaki, & Okamura, 2001) examina las condiciones previas que afectan a la calidad de los servicios ferroviarios en Tokio y sus implicaciones en la política de gestión.

En esta tesis la selección y agrupación de los criterios ha tenido una evolución. En un principio se siguió un modelo jerárquico (AHP). Para ello se identificaron 23 criterios agrupados en 7 grupos. Una vez

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

analizado este modelo, se observó que existían influencias entre criterios. Para analizar estas influencias y obtener una ponderación de los criterios se utilizó el método ANP, el cual a su vez evolucionó desde un modelo simple con dos subredes de Costes-Beneficios a otro más elaborado con cuatro subredes de Beneficios, Oportunidades, Costes y Riesgos (BOCR), basado en la sugerencia de (Saaty, 2005)

4.4.1. Identificación y agrupación de criterios según el modelo jerárquico

Al final del proceso el decisor, apoyado en el equipo de análisis, identificó 24 criterios agrupados en 7 grupos o clusters, enunciados a continuación:

1. CSC. Criterios de Seguridad en la circulación.
2. CSE. Criterios de Eficiencia en la explotación.
3. CET. Criterios de Eficiencia técnica.
4. CUS. Criterios de Utilidad social.
5. CEE. Criterios de Eficiencia económica
6. CSA. Criterios de Sostenibilidad medioambiental.
7. CTV. Criterio de Tramo de vía.

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

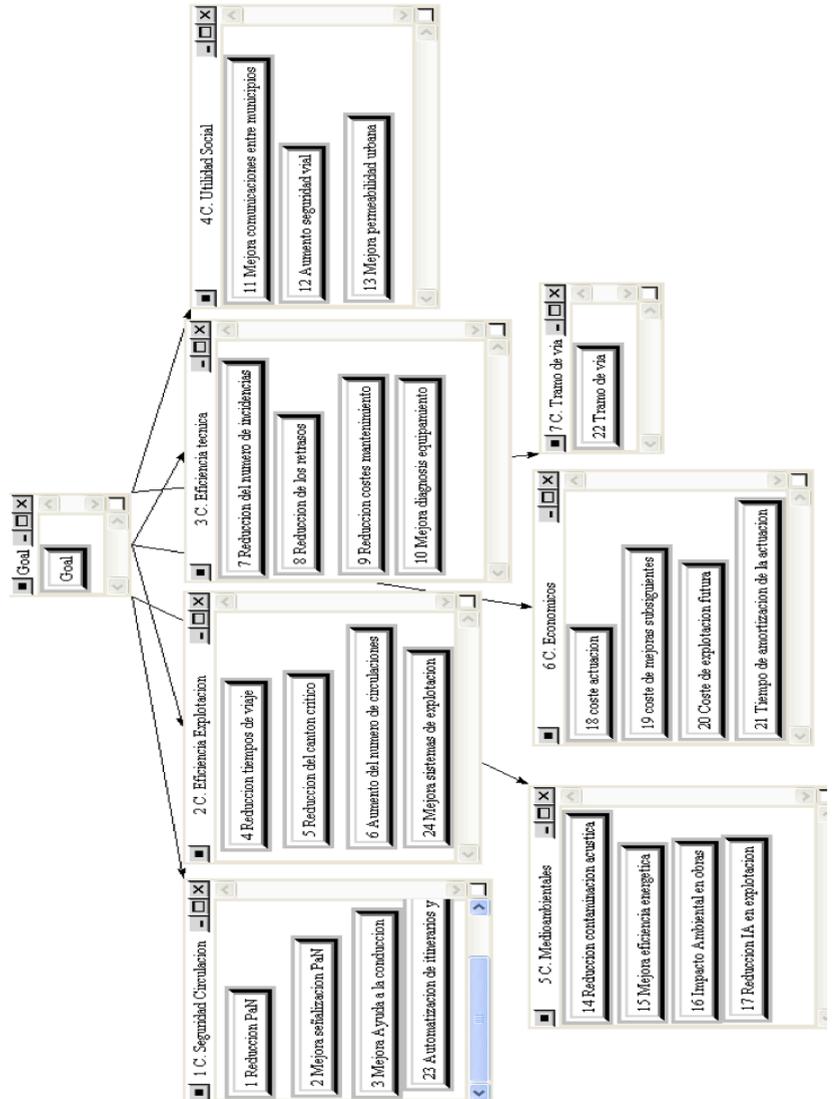


Figura 4 3 Esquema de la jerarquía AHP

Definimos a continuación los grupos de criterios y los subcriterios considerados.

1. CSC. Criterios de seguridad en la circulación.

Los criterios de seguridad en la circulación describen el efecto de la actuación considerada sobre la seguridad en la circulación del tramo en estudio. La seguridad en la circulación se divide en dos grandes campos, seguridad en la explotación y el funcionamiento de los trenes y la seguridad de las personas por el efecto del ferrocarril.

La seguridad en la explotación la dan todas las actuaciones que reduzcan la posibilidad o la gravedad de un malfuncionamiento del tren que pueda provocar un descarrilamiento o un choque entre trenes. La seguridad de las personas por el efecto del ferrocarril se emplaza principalmente en el campo de los arrollamientos, donde cualquier actuación que reduzca las posibilidades de arrollamiento en la vía, de forma pasiva o activa, tanto en un paso a nivel como en cualquier otro lugar de la red, tendrá una actuación positiva sobre este criterio.

Los subcriterios que se han desarrollado son:

CSC.C1.- Reducción del número de pasos a nivel.

Los pasos a nivel son los elementos donde se pueden producir más accidentes debido a ser el punto de cruce de la infraestructura ferroviaria de los peatones, animales y otros vehículos. Cualquier reducción en el número de pasos a nivel reduce las posibilidades de accidentes en cuanto que desaparece el punto de cruce como tal. Se ha documentado el importante efecto reductor de incidencias en los archivos históricos de mantenimiento correctivo de ADIF y también en la literatura como (Thomas et al., 2005)

La valoración de las actuaciones para este criterio se realiza mediante las siguientes categorías:

- Total: Tras la actuación no queda ningún paso a nivel en el tramo considerado.
- Significativa: Se reduce el número de pasos a nivel pero aún queda al menos uno en servicio.
- Parcial: Se reduce el número de pasos a nivel pero quedan varios en servicio en el tramo.
- Indiferente: El número de pasos a nivel permanece constante tras la actuación.

- Aumento: Tras la actuación aumenta el número de pasos a nivel en el tramo estudiado.

CSC.C2.- Mejora de la señalización de pasos a nivel.

Por las mismas razones que lo anterior, en cuanto se mejora la señalización del paso a nivel disminuyen las posibilidades de un accidente en este. (Thomas et al., 2005) estiman que el riesgo de un accidente en el ferrocarril se localiza en un 44,9% en los pasos a nivel. (Holz-Rau & Scheiner, 2011) describen como se minusvalora sistemáticamente el coste de la vida en los análisis de costo beneficio y calculan un nuevo valor en función de los años de vida estadística perdidos en accidentes, remarcando la importancia de la seguridad. La mejora depende del tipo de señalización instalada anteriormente y del nuevo tipo de señalización.

Las categorías consideradas son las siguientes:

- Muy alta: El cambio en la señalización es muy elevado pasando de un bajo nivel al nivel máximo.
- Alta: El cambio en la señalización es muy alto, pero no tan elevado como en el caso anterior.
- Significativa: El cambio es muy importante pero no extremo.
- Despreciable: Aunque existen cambios no afectan en gran medida a la señalización de los pasos a nivel.
- Reducción: La señalización de los pasos a nivel disminuye de calidad.

CSC.C3.- Mejora de los sistemas de ayuda a la conducción.

Dentro de los sistemas de ayuda a la conducción se incluyen los sistemas de apoyo al maquinista y todos los componentes del sistema de señalización. En este caso los sistemas que supervisan la temperatura de los ejes y los detectores de impacto en la rueda, de reciente implantación, también se consideraran sistemas de ayuda a la conducción, por cuanto detectan el malfuncionamiento de un equipo del tren, que sin supervisión podría provocar una avería grave.

Cualquier actuación que genere un cambio del sistema de ayuda a la conducción existente o que incorpore en éste nuevas funcionalidades tendrá influencia sobre este criterio.

Las categorías consideradas son las siguientes:

- Muy alta: La mejora en los sistemas de ayuda a la conducción es muy elevada pasando de un bajo nivel al nivel máximo.
- Alta: El cambio en los sistemas de ayuda a la conducción es muy alto, pero no tan elevado como en el caso anterior.
- Significativa: El cambio es muy importante pero no extremo.
- Despreciable: Aunque existen cambios no afectan en gran medida a la calidad de los sistemas de ayuda a la conducción.
- Reducción: Desaparecen sistemas de ayuda a la conducción existentes.

CSC.C4.- Automatización de Itinerarios y bloqueos.

Existen actuaciones que, sin realizar ningún cambio en la infraestructura propiamente dicha, es decir la vía y la catenaria, pueden mejorar la rapidez de la gestión de ésta, por ejemplo la instalación de sistemas automatizados de explotación de los enclavamientos de las estaciones, todo tipo de mejoras que permitan aumentar el número de trenes y su velocidad mediante modificaciones en las instalaciones de señalización, (por ejemplo el paso de bloqueo telefónico a bloqueo automático o la puesta en marcha de banalizaciones en vías dobles).

En general, los sistemas de automatización de itinerarios y bloqueos permiten aumentar la seguridad de la explotación al reducirse el número e importancia de los errores humanos y aumentar la utilidad de la instalación manteniendo o aumentando los niveles de seguridad.

Las categorías consideradas son las siguientes:

- Muy alta: El cambio en la automatización es muy elevado pasando de un bajo nivel al nivel máximo.
- Alta: El cambio en la automatización es muy alto, pero no tan elevado como en el caso anterior.
- Significativa: El cambio es muy importante pero no extremo.
- Despreciable: Aunque existen cambios no afectan en gran medida a la automatización de itinerarios y bloqueos.

2. CSE. Criterios de eficiencia en la explotación.

Estos criterios describen el efecto de las actuaciones que permitan aumentar el número de trenes/pasajeros que usan la red debido a mejoras técnicas o de gestión, así como la reducción del coste energético del transporte, no se tienen en cuenta medidas que afecten al material móvil ni a las estaciones en cuanto a su accesibilidad ni accesos desde los núcleos urbanos.

Dentro de estos criterios se considerara la reducción del consumo de energía, la reducción de los tiempos de desplazamiento, reducciones de los cuellos de botella y optimización de la red y de su uso. Se tendrá en cuenta tanto el funcionamiento de la instalación durante la actuación como una vez finalizada esta.

Los subcriterios que se han desarrollado son:

CSE.C5.- Reducción de los tiempos de viaje.

Las actuaciones que mejoran los trazados, suavizando curvas o rampas y eliminando tramos innecesarios permiten reducir los tiempos de viaje, con lo que se aumenta la capacidad de la infraestructura. Esta mejora es más importante cuanto más se reduzca el tiempo de viaje, por lo que estas mejoras serán más importantes en los tramos de línea con limitaciones de velocidad significativas. También se reduce el tiempo de viaje en cuanto se montan desvíos preparados para su paso a velocidades lo más cercanas a la nominal de la línea posible. Este criterio es importante puesto que, como se demuestra en (Fitzroy, Smith, & Germany, 1995), la demanda de transporte y la satisfacción de los viajeros aumenta la disminuir el tiempo de viaje. "Los ferrocarriles de alta velocidad en Francia y Japón han generado o inducido tráfico del orden del 35% y habitualmente valores superiores al 30% del tráfico desviado desde otros modos" (King, 1996). La demanda de ferrocarril se puede asumir que depende de los precios y la calidad del ferrocarril y de los medios alternativos (Asensio, 2000). (Bradley, 1993) demuestra que la demanda no es elástica frente a ambos cambios en calidad (medida como oferta de lugares a los que desplazarse dentro de la red) y precio, aunque es más sensible a los cambios en la calidad que en el precio según el resultado estándar en la literatura de demanda de transporte. Las mejoras de calidad pueden ser muy efectivas para atraer nuevos clientes, especialmente en grandes ciudades, donde la congestión de la carretera es mucho mayor (Asensio, 2000), según (Ieda et al., 2001) la congestión y el tiempo de viaje son valores fuertemente asociados con el nivel de insatisfacción de los usuarios. Aunque (Mokhtarian & Salomon, 2001) y (Hensher & McLeod, 1977) valoran el tiempo de viaje en sí y la utilidad productiva del tiempo de viaje como un factor que puede ser valorable positivamente por el usuario, variando la valoración del tiempo de viaje en función de la calidad de éste por sus usos alternativos.

Las categorías consideradas son las siguientes:

- Mayor 20%: Se reduce el tiempo de viaje en el tramo en condiciones normales en un 20% o más.
- Mayor 10%: Se reduce el tiempo de viaje en el tramo en condiciones normales en un 10% o más.
- Mayor 5%: Se reduce el tiempo de viaje en el tramo en condiciones normales en un 5% o más.
- Menor 1%: Se reduce el tiempo de viaje en el tramo en condiciones normales en menos de un 1%, los cambios son mínimos.
- Reducción: El tiempo de viaje en el tramo aumenta.

CSE.C6.- Reducción del cantón crítico.

Como cualquier infraestructura o proceso lineal, la capacidad de todo el tramo está limitada por la capacidad de la parte más débil, que es el cuello de la botella del tramo y el que marca la capacidad máxima. Toda actuación que reduzca el cantón crítico, pero no a cambio de generar otro de menor capacidad, aumentará la capacidad de la red y reducirá la criticidad de éste, reduciéndose el número de trenes retrasados, el retraso de estos y aumentando la rapidez de la red en recuperar su situación óptima. (Sullivan, Novak, Aultman-Hall, & Scott, 2010) estudian la robustez de una red de carreteras frente a pequeñas perturbaciones, con una metodología aplicable también a ferrocarriles. (Thomas et al., 2005) expone la preferencia de los usuarios a un sistema de alta fiabilidad frente a aumentos de la velocidad media o del número de frecuencias y (Schöbel, 2009) muestra la importancia de la concatenación de retrasos entre los trenes. (Abril et al., 2008) hacen un estudio muy exhaustivo de todos los factores que afectan a la capacidad y demuestran que en muchos casos la limitación a la capacidad general de una línea se debe a la limitación en la capacidad de un tramo o cantón determinado dentro de este. (Dicembre & Ricci, 2011) exponen medidas a adoptar para mejorar la capacidad de los cantones más críticos en relación con la señalización.

Las categorías consideradas son las siguientes:

- Mayor 20%: Se reduce la longitud del cantón crítico en condiciones normales en un 20% o más.
- Mayor 10%: Se reduce la longitud del cantón crítico en el tramo en condiciones normales en un 10% o más.
- Mayor 5%: Se reduce la longitud del cantón crítico en el tramo en condiciones normales en un 5% o más.

- Menor 1%: Se reduce la longitud del cantón crítico en el tramo en condiciones normales en menos de un 1%, los cambios son mínimos.
- Reducción: La longitud del cantón crítico en el tramo aumenta.

CSE.C15.- Aumento del número de circulaciones.

Toda actuación que permita aumentar el número de circulaciones por un tramo aumenta la eficacia o productividad de las instalaciones de una forma directa, siendo este factor el más fácil de evaluar de todos los anteriores. (Fitzroy et al., 1995) demuestran que la frecuencia de trenes y la densidad de rutas, junto con la densidad de población explican gran parte de las diferencias entre las demandas de transporte de los diferentes países estudiados. (Make & Preston, 1998) además de dar 22 razones para la parcialidad en evaluación de proyectos, describen el retardo temporal en el aumento de usuarios al aumentar la oferta de la siguiente manera: "De cualquier nuevo producto se espera que aumente la demanda con el tiempo, a esto se le conoce como curva de despegue del producto, que muchas veces se descuida, por ejemplo, en las nuevas estaciones en West Yorkshire. Los análisis a posteriori demostraron que la demanda necesitó 5 años para alcanzar su nivel de equilibrio, siendo la demanda del año 1 solo un 57% de la demanda del año 5". (Make & Preston, 1998) considera fundamental el añadir estas curvas de aprendizaje en el análisis económico de los proyectos para estimar la demanda en las fases intermedias.

Las categorías consideradas son las siguientes:

- Mayor 100%: Aumenta el número de circulaciones posibles en condiciones normales en un 100% o más.
- Mayor 50%: Aumenta el número de circulaciones posibles en el tramo en condiciones normales en un 50% o más.
- Mayor 20%: Aumenta el número de circulaciones posibles en el tramo en condiciones normales en un 20% o más.
- Menor 10%: Aumenta el número de circulaciones posibles en el tramo en condiciones normales en menos de un 10%, los cambios son mínimos.
- Reducción: El número de circulaciones posibles en el tramo disminuye.

CSE.C7.- Mejora de los sistemas de explotación.

Toda instalación tiene unas características de explotación máxima teórica, que nos marca la máxima velocidad a la que pueda circular un tren (por las limitaciones propias de este y de la infraestructura) y la distancia mínima entre ellos, denominada distancia de frenado. Todo cambio en el sistema de regulación de la explotación que permita acercar la explotación real a la máxima teórica, resulta importante para aumentar la capacidad y reducir los retrasos causados por la acumulación de trenes. Uno de los ejemplos clásicos es la instalación de señales indicadoras de velocidad en agujas de estaciones. (Dicembre & Ricci, 2011) demuestran que el uso de cantones de bloqueo más cortos, que garantiza una distancia reducida entre los trenes que se acercan a la estación, permiten obtener altos niveles de capacidad con un alto nivel de servicio (previniendo la formación de colas y retrasos). El trabajo también muestra que la reducción de los tiempos de parada, la homogenización de las velocidades de los trenes y programar trenes de la misma velocidad consecutivamente contribuye a aumentar la capacidad.

Las categorías consideradas son las siguientes:

- Muy alta: La mejora en los sistemas de explotación es muy elevada pasando de un bajo nivel al nivel máximo.
- Alta: La mejora en los sistemas de explotación es muy alta, pero no tan elevada como en el caso anterior.
- Significativa: El cambio es muy importante pero no extremo.
- Despreciable: Aunque existen cambios no afectan en gran medida a los sistemas de explotación.

3. CET. Criterios de Eficiencia Técnica.

Este grupo de criterios engloba a todos los factores, que aunque no impliquen un cambio en la operación realizada por la instalación permiten que esta realice su función más adecuadamente, como por ejemplo, todos los cambios que permiten reducir el número de actuaciones de mantenimiento correctivo, que alarguen la vida útil de los equipos instalados y que faciliten la diagnosis y el mantenimiento preventivo de las instalaciones. Dentro de estos criterios se valorará también las ganancias en fiabilidad del sistema en situaciones degradadas, y en general, todo lo que posibilite que el sistema funcione al máximo nivel de calidad durante el mayor tiempo posible al mínimo costo. En (Huisman & Boucherie, 2001) se estudia el efecto de las averías sobre la capacidad real en condiciones de trenes heterogéneos y el aumento de los retrasos al haber circulaciones heterogéneas frente a redes homogéneas.

Los criterios considerados son:

CET.C8.- Reducción en el número de incidencias.

Este criterio evalúa la reducción en el número de incidencias anuales que generaría la actuación. El número de incidencias penaliza el funcionamiento de la instalación, aunque sean menores y de poca importancia, ya que implican un alto coste de oportunidad, porque suponen el desplazamiento de personal operativo para la actuación correctiva, desplazándose de sus funciones de preventivo y dejando de estar disponibles para otra actuación correctiva. Por ello cualquier actuación que permita reducir el número de incidencias, tanto menores como graves, mejorara los tiempos de respuesta y la productividad del mantenimiento preventivo.

Las categorías consideradas son las siguientes:

- Mayor 50%: Se reduce el número de incidencias en un 50% o más.
- Mayor 20%: Se reduce el número de incidencias en un 20% o más.
- Mayor 10%: Se reduce el número de incidencias en un 10% o más.
- Menor 1%: Se reduce el número de incidencias en menos de un 1%, los cambios son mínimos.
- Aumento: El número de incidencias aumenta.

CET.C9.- Reducción de los retrasos.

Las actuaciones también pueden modificar no el número de incidencias sino la importancia de éstas. La mejor forma de evaluar la importancia de una incidencia, descartando temas de seguridad, que por su importancia se evalúan de forma independiente, es categorizarlas por el retraso que generan en la circulación. Los retrasos son útiles como aproximación a la importancia de la avería, como se demuestra en (Huisman & Boucherie, 2001) por afectar a la capacidad y a la puntualidad esperada. (Asensio & Matas, 2008) consideran la importancia de la variabilidad en los tiempos de viaje sobre la satisfacción de los usuarios. Por esto se evaluará la reducción en los tiempos de retraso que genere una actuación. Esta reducción puede venir por dos caminos: la reducción del número de averías, aunque se mantenga el retraso medio en éstas, o la reducción del retraso medio generado por la incidencia, manteniendo el número de

averías. Como es lógico también existen situaciones intermedias, que generan reducciones de los retrasos.

Además, con este criterio se evalúa en parte la incidencia de la avería sobre la circulación, en función del nivel de capacidad usado de la infraestructura, ya que una línea infrautilizada, por mucho que se mejoren las características de esta, no sufrirá una reducción significativa de los retrasos. Sin embargo, una línea saturada, en la que cualquier incidencia genera muchos retrasos, con la misma modificación, reducirá en mucho sus retrasos. Las diferencias entre líneas saturadas y no saturadas se describe en (Abril et al., 2008)

Las categorías consideradas son las siguientes:

- Mayor 50%: Se reducen los minutos de retraso en un 50% o más.
- Mayor 25%: Se reducen los minutos de retraso en un 25% o más.
- Mayor 10%: Se reducen los minutos de retraso en un 10% o más.
- Menor 5%: Se reducen los minutos de retraso en menos de un 5%, los cambios son mínimos.
- Aumento: El número de minutos de retraso aumentan.

CET.C16.- Reducción de los costes de mantenimiento.

Los costes de mantenimiento tienen varios componentes, que se evalúan de forma conjunta en este criterio, los componentes son:

- Horas de mano de obra en mantenimiento preventivo.
- Horas de mano de obra en mantenimiento correctivo.
- Material a renovar durante el mantenimiento correctivo.
- Material a renovar durante el mantenimiento preventivo.
- Costes de explotación de la infraestructura.
- Coste de oportunidad del mantenimiento.

Todos estos componentes sufren alteraciones cada vez que se realiza alguna actuación que cambia las características de la instalación. Los 4 primeros criterios son autoexplicativos, sin embargo los siguientes se describen a continuación:

- El coste de explotación de la infraestructura es el coste de mantener operativa la instalación en condiciones normales, principalmente costes de energía, aunque también incluye el de personal de supervisión o vigilancia que esté asociado a estas operaciones, principalmente: personal de Telemandos en líneas modernas y en líneas más antiguas, el personal vinculado a puestos fijos, como los guardabarreras o ayudantes ferroviarios, que son los responsables de la circulación en las estaciones.

- El coste de oportunidad del mantenimiento define los costes indirectos que genera una actuación de mantenimiento, principalmente los debidos a la indisponibilidad de la instalación durante su revisión o reparación y el problema que esto genera a la explotación. Cualquier medida que permita funcionar a la instalación, aun en condiciones degradadas durante el mantenimiento mejorará los costes del mantenimiento de esta línea.

No existen bases de datos normalizadas que permitan comparar de forma directa o al menos semi-directa los costes de mantenimiento entre diferentes administraciones ferroviarias. A nivel europeo existen grupos de trabajo que estudian las mejores técnicas disponibles de cara a reducciones significativas de los costes de mantenimiento. Los datos obtenidos se pueden consultar en (Bouch, Roberts, & Amoore, 2010). (Johansson & Nilsson, 2004) evalúan los costes de mantenimiento de los ferrocarriles suecos y finlandeses, tanto en forma total como marginal, describiendo los principales factores que afectan al coste de mantenimiento, la longitud de la vía, el nivel de utilización (las toneladas kilómetro) y un vector de las variables técnicas de vía (número de desvíos, número de túneles, etc..) También demuestran que, una vez eliminado el efecto de los demás factores, las diferencias en el coste de mantenimiento para los diferentes tipos de vía desaparecen. También se puede afirmar que para las líneas principales, duplicar las vías (pasar de vía única a doble) reduce los costes medios de mantenimiento. La elasticidad de coste con respecto a aumentar el número de desvíos es 0.705 basada en el número total de desvíos y en el coste total de mantenimiento. Se puede deducir que cada desvío adicional aumenta el coste de mantenimiento en 14,000 SEK (1.631 € de 2013).

Los costes de mantener las vías aumentan con el tiempo tarde o temprano, y en algún momento el coste de mantenimiento anual será la suficientemente grande como para que sea más eficaz una renovación de la instalación. Mejor que ir gastando unas cantidades crecientes de dinero en el mantenimiento actual, resulta más barato sustituir carriles y traviesas en tramos largos de la línea, cambiar desvíos, etc., ahorrando dinero para el futuro. El ritmo de renovación está marcado por el uso de la instalación, cuanto mayor sea el uso mayor será la frecuencia de sustitución.

Pese a los resultados obtenidos, los ya citados (Johansson & Nilsson, 2004) creen que generalizar a otros países es complicado ya que solo se

han estudiado dos países, en la misma zona climática y que sus toneladas kilómetro son más bajas que en otros países europeos, sobre todo al tener en cuenta que los costes marginales se mantienen constantes cuando las toneladas kilómetro superan un valor umbral.

Las categorías consideradas son las siguientes:

- Mayor 50%: Se reducen los costes de mantenimiento en un 50% o más.
- Mayor 25%: Se reducen los costes de mantenimiento en un 25% o más.
- Mayor 10%: Se reducen los costes de mantenimiento en un 10% o más.
- Menor 1%: Se reducen los costes de mantenimiento en menos de un 1%, los cambios son mínimos.
- Aumento 10%: Los costes de mantenimiento aumentan más del 10%.
- Aumento 20%: Los costes de mantenimiento aumentan más del 20%.

CET.C25 Mejora de la diagnosis del equipamiento.

Uno de los principales problemas que reviste el mantenimiento ferroviario, y el mantenimiento en general, es la identificación del defecto original, ya que lo que inicialmente se descubre son las consecuencias, y solamente tras hacer una investigación se llega a las causas; aunque no siempre se identifican las causas últimas sino solo las causas parciales. La implementación de sistemas o la adaptación de lo existente para facilitar la diagnosis de la situación en tiempo real, es una de las mejores actuaciones posibles de cara a mejorar significativamente la respuesta y la efectividad del mantenimiento. Estas actuaciones tienen un efecto transversal sobre el resto de los criterios de eficiencia técnica, pero tiene tal importancia que conviene estudiarlo como criterio independiente.

Las categorías consideradas son las siguientes:

- Mucha Mejora: La mejora en la diagnosis es muy alta. Pasando de no poder realizar análisis previos a poder evaluar el estado de la instalación.
- Mejora elevada: La mejora es muy alta, aunque ya existían sistemas básicos de diagnosis.
- Mejora significativa: Se mejora la diagnosis de forma importante, pero sin grandes cambios para con lo existente.
- Mejora despreciable: La diagnosis se ve afectada por la actuación, pero no de forma importante.

- Reducción: Perdemos capacidad de diagnóstico del estado de los equipos a mantener.

4. CUS. Criterios de Utilidad social.

Dentro de este grupo de criterios se considerara el efecto que tienen las actuaciones sobre la utilidad social de la red ferroviaria, en su función de comunicación de núcleos de población y el efecto del ferrocarril sobre la estructura de las ciudades. Dentro de la utilidad social se podría considerar el efecto del cambio de las frecuencias y tiempos de viaje, ya que como se muestra en (Fitzroy et al., 1995), es uno de los componentes claves para aumentar la demanda de transporte por ferrocarril (Laird, Geurs, & Nash, 2009) evalúan los beneficios, la utilidad social, para los no usuarios de una infraestructura de transporte, aunque, al nivel de decisiones estudiado en este trabajo no es relevante.

CUS.C26.- Mejora de las comunicaciones entre los municipios.

Al estar evaluando una red de ferrocarril pesado o clásico, el principal efecto de comunicaciones es entre municipios, al contrario que en los metropolitanos o tranvías que realizan funciones principalmente intramunicipios. Toda actuación que permite mejorar la frecuencia de los trenes, la reducción de los tiempos de viaje o en general, la capacidad de transporte desde y hasta los municipios vinculados a la línea, tendrá una utilidad social significativa, más significativa cuanto mayor sea el cambio de disponibilidad de transporte entre la situación inicial y final.

Las categorías consideradas son las siguientes:

- Muy alta: La mejora en las comunicaciones es muy elevada pasando de un bajo nivel al nivel máximo.
- Alta: La mejora en las comunicaciones es muy alta, pero no tan elevada como en el caso anterior.
- Significativa: El cambio las comunicaciones es muy importante pero no extremo.
- Despreciable: Aunque existen cambios no afectan en gran medida a las comunicaciones
- Reducción: Se reducen las comunicaciones entre los municipios.

CUS.C10.- Mejora de la seguridad vial del entorno.

La importancia de este criterio se debe a que la reducción de accidentes causados directa o, mucho más comunes, indirectamente por las infraestructuras ferroviarias es uno de los temas centrales en toda la política de gestión de ADIF y de las administraciones ferroviarias en general. Este punto además es uno de los que menos vinculado está a las grandes decisiones de planificación de líneas de todas las funciones de utilidad social del ferrocarril.

Las categorías consideradas son:

- Muy alta: El aumento de la seguridad vial es muy elevado pasando de un bajo nivel al nivel máximo.
- Alta: El aumento de la seguridad vial es muy alto, pero no tan elevado como en el caso anterior.
- Significativa: El aumento de la seguridad vial es muy importante pero no extremo.
- Despreciable: Aunque existen cambios no afectan en gran medida a la seguridad vial.
- Reducción: Se reduce la seguridad vial entre los municipios.

CUS.C27.- Mejora de la permeabilidad urbana.

El efecto barrera que genera la infraestructura ferroviaria, sobre todo en superficie, es uno de los principales efectos negativos del ferrocarril sobre las poblaciones por las que pasa. Por ello todas las actuaciones que reduzcan este efecto, o lo atenúen en gran medida, permitirán que, a igualdad del resto de condiciones, la percepción del ferrocarril sea mejor por parte de la población, tanto de los usuarios como de los que no los son. Las categorías consideradas son:

- Muy alta: El aumento de la permeabilidad urbana es muy elevado pasando de un bajo nivel al nivel máximo.
- Alta: El aumento de la permeabilidad urbana es muy alta, pero no tan elevada como en el caso anterior.
- Significativa: El aumento de la permeabilidad urbana es muy importante pero no extremo.
- Despreciable: Aunque existen cambios no afectan en gran medida a la permeabilidad urbana.
- Reducción: Se reduce la permeabilidad urbana entre los municipios.

5. CEE. Criterios de Eficiencia Económica.

Con este grupo de criterios compararemos el coste que implica la actuación, tanto en explotación como en ejecución, valorando el tiempo de amortización de esta y la influencia en el coste de otras mejoras futuras.

CEE.C22.- Coste de la actuación de mejora.

De forma evidente es preferible que el coste de cualquier actuación sea lo más reducido posible, siendo preferible a igualdad de resultados la más barata. Las categorías consideradas son:

- Mayor 45 Meuros: La actuación tiene un coste de más de 45 millones de euros.
- Mayor 25 Meuros: La actuación tiene un coste de más de 25 millones de euros.
- Mayor 15 Meuros: La actuación tiene un coste de más de 15 millones de euros.
- Mayor 7 Meuros: La actuación tiene un coste de más de 7 millones de euros.
- Mayor 3 Meuros: La actuación tiene un coste de más de 3 millones de euros.
- Menor 3 Meuros: La actuación tiene un coste de menos de 3 millones de euros.

CEE.C17.- Coste de Mejoras subsiguientes.

Con este criterio tenemos en cuenta que una solución que a priori puede resolver una situación, puede implicar en el futuro sobrecostes muy elevados en tratamientos sucesivos o imposibilite reformas posteriores, convirtiéndose en una limitación importante para el futuro uso de la infraestructura. De forma inversa, toda actuación que permite ampliarse con un coste futuro más reducido, será siempre más preferible a la que vincule rígidamente a una solución.

Las categorías consideradas son:

- Muy alto: El coste de mejoras subsiguientes es muy alto en proporción a la actuación.
- Alto: El coste de mejoras subsiguientes es alto en proporción a la actuación.
- Importante: El coste de mejoras subsiguientes es medio en proporción a la actuación.
- Despreciable: El coste de mejoras subsiguientes es muy bajo en proporción a la actuación.

CEE.C23.- Coste de explotación futura.

Este criterio evalúa el efecto de la actuación sobre el coste de operación futuro del tramo tras la actuación, comparado con el coste de operación actual. La inclusión de este factor es importante puesto que no es común actualmente evaluar las actuaciones en base a su futuro coste de explotación. Habitualmente las soluciones muy complejas y avanzadas tienen un alto coste de explotación, según la experiencia de uso en ADIF. Se puede asumir un mayor coste de explotación a cambio de un aumento muy significativo de la funcionalidad, pero si las funcionalidades que se añaden son poco efectivas en cuanto a cambios en los resultados obtenidos de la infraestructura, puede no tener sentido el ampliar la funcionalidad.

Las categorías consideradas son las siguientes:

- Mayor 120%: El coste de explotación futura es mayor al 120% del coste actual.
- Mayor 110%: El coste de explotación futura es mayor al 110% del coste actual.
- Mayor 100%: El coste de explotación futura es mayor al 100% del coste actual.
- Mayor 80%: El coste de explotación futura es mayor al 80% del coste actual.
- Mayor 60%: El coste de explotación futura es mayor al 60% del coste actual.
- Menor 50%: El coste de explotación futura es menor al 50% del coste actual.

CEE.C28.- Tiempo de amortización de la actuación.

Con este criterio se evalúa la correcta adecuación de la actuación a las circunstancias de la línea. Este factor se debe minimizar y buscar siempre las actuaciones que tengan un plazo de amortización lo más bajo posible. En general en construcción ferroviaria, los plazos de amortización son muy largos con lo que una reducción media de estos plazos significa una importante reducción del coste económico y de optimización de recursos económicos. Las categorías consideradas son las siguientes:

- Mayor 50 años: El tiempo de amortización es mayor de 50 años.
- Mayor 30 años: El tiempo de amortización es mayor de 30 años.
- Mayor 20 años: El tiempo de amortización es mayor de 20 años.
- Mayor 10 años: El tiempo de amortización es mayor de 10 años.
- Mayor 5 años: El tiempo de amortización es mayor de 5 años.
- Menor 5 años: El tiempo de amortización es menor de 5 años.

6. CSA. Criterio de Sostenibilidad Medioambiental.

Este grupo de criterios tendrá en cuenta el efecto sobre el medio ambiente de la actuación, tanto durante la ejecución de esta como en el funcionamiento tras la actuación. Dentro de estos criterios ambientales se incluyen tanto la contaminación directa como indirecta, el consumo de recursos y el efecto de la actuación en el ambiente de la zona aneja a la vía.

CSA.C29.- Reducción de la contaminación acústica.

Uno de los principales problemas, tanto para la gente que vive en las inmediaciones de la vía, como para la fauna en las zonas rurales, es el ruido de los vehículos, que disminuye la calidad de vida percibida de las personas y afecta los hábitos vitales de la fauna. Estos efectos están documentados en (Yuan, Xv, & Yang, 2006), (Kim, Chung, SONG, & HONG, 2005) y (Brons, Nijkamp, Pels, & Rietveld, 2003) por lo que toda actuación que reduzca el ruido, tanto emitido como percibido mejorará la integración ambiental del ferrocarril. Resulta mucho más importante el efecto en áreas urbanas, ya que son mayores las circulaciones y la presencia de personas en esos entornos.

Las categorías consideradas son:

- Muy alta: La reducción de la contaminación acústica es muy elevada pasando de un bajo nivel al nivel máximo.
- Alta: La reducción de la contaminación acústica es muy alta, pero no tan elevada como en el caso anterior.
- Significativa: La reducción de la contaminación acústica es muy importante pero no extremo.
- Despreciable: Aunque existen cambios no afectan en gran medida a la contaminación acústica generada.
- Aumento: Aumenta la contaminación acústica entre los municipios.

CSA.C30.- Mejora de la eficiencia energética.

Todas las actuaciones que reducen el consumo de energía, tanto en situación óptima como en degradada, o que faciliten su reducción, mejoran la eficiencia energética, reduciendo la huella ambiental del transporte y por ello mejoran su integración ambiental. Este tipo de actuaciones incluyen las mejoras en las subestaciones y/o catenaria, pero también la reducción de rampas y pendientes o el evitar actuaciones

intempestivas de señales, que provocan frenadas de emergencia o innecesarias. También tienen este efecto las reducciones de limitaciones de velocidad, al reducirse el número de frenadas y aceleraciones. La importancia de todos estos factores en el consumo energético fue evaluada por (García Álvarez, 2007) en función del tipo de servicio ferroviario y el estado de la infraestructura.

Las categorías consideradas son las siguientes:

- Mayor 20%: Se reduce el consumo energético en condiciones normales en un 20% o más.
- Mayor 10%: Se reduce el consumo energético en el tramo en condiciones normales en un 10% o más.
- Mayor 5%: Se reduce el consumo energético en el tramo en condiciones normales en un 5% o más.
- Menor 1%: Se reduce el consumo energético en el tramo en condiciones normales en menos de un 1%, los cambios son mínimos.
- Reducción: El consumo energético en el tramo aumenta.

CSA.C31.- Reducción Impacto ambiental durante la actuación.

Toda actuación tiene un efecto ambiental, de forma que cuanto menor sea éste mejor será valorado con respecto a este criterio. Esto incluye desde actuaciones con reducido efecto ambiental a métodos de ejecución de los trabajos más eficientes en términos ambientales y de afección a los espacios naturales.

Las categorías consideradas son:

- Muy alto: La reducción del impacto ambiental es muy elevada pasando de un bajo nivel al nivel máximo.
- Alto: La reducción del impacto ambiental es muy alta, pero no tan elevada como en el caso anterior.
- Significativo: La reducción del impacto ambiental es muy importante pero no extremo.
- Despreciable: Aunque existen cambios no afectan en gran medida al impacto ambiental generado.
- Aumento: Aumenta el impacto ambiental durante la actuación.

CSA.C32.- Reducción impacto ambiental FFCC.

Existen multitud de efectos ambientales menores que tiene el ferrocarril sobre la naturaleza, desde positivos, como por ejemplo, servir de cortafuegos y de vigilancia de incendios, a negativos, como el efecto

barrera de la fauna. La valoración de todos estos efectos se realiza de manera conjunta en este criterio, donde evaluamos el efecto a largo plazo de la explotación ferroviaria sobre el medio ambiente. Las categorías consideradas son:

- Muy alto: La reducción del impacto ambiental es muy elevada pasando de un bajo nivel al nivel máximo.
- Alto: La reducción del impacto ambiental es muy alta, pero no tan elevada como en el caso anterior.
- Significativo: La reducción del impacto ambiental es muy importante pero no extremo.
- Despreciable: Aunque existen cambios no afectan en gran medida al impacto ambiental generado.
- Aumento: Aumenta el impacto ambiental en explotación.

7. CTV.C33 Criterio de tramo de vía.

Según el análisis que se ha realizado en esta tesis, y que se expone en el apartado 4.3.2, se ha caracterizado los diferentes tramos de la línea en función de las características comunes a cada uno de ellos.

Esta agrupación de los diferentes tramos nos permite priorizar las actuaciones en función de la importancia de la línea, ya que no es lo mismo una línea secundaria o un ramal técnico que un tramo de línea troncal con mucho tráfico.

Este criterio no se divide en subcriterios sino que es un criterio directo de las características del tramo, los grupos que se han considerado son:

- Líneas troncales de buenas prestaciones.
- Líneas troncales con Pasos a Nivel.
- Líneas troncales de vía única.
- Líneas troncales de alta incidencia.
- Líneas secundarias.
- Ramales Técnico.

La definición de cada tramo se hace en el siguiente apartado, con lo que, en cada alternativa, se han de introducir las características de su tramo para poder definir el tipo de línea en el que se aplica la actuación.

4.4.2. Técnica de clasificación Post-Hoc. Algoritmo de las K-Medias.

Ante la imposibilidad práctica de poder analizar todas las actuaciones en un tiempo aceptable se ha decidido usar una técnica de clasificación para obtener grupos homogéneos y reducir el campo de selección con una reducción mínima de la información.

El método elegido para la clasificación, es el algoritmo de la K-medias, (MacQueen, 1967) un método no jerárquico, en el que se eligen a priori el número de grupos en el que se va a dividir los datos. Se ha usado este método porque, al no conocer a priori como pueden ser las agrupaciones, permite estudiar cómo se agrupan los casos de forma natural. Este es el método recomendado para grandes tablas de datos como este caso y permiten detectar los casos atípicos (Jain, Murty, & Flynn, 1999).

Este algoritmo parte de unas medias arbitrarias y mediante pruebas sucesivas, contrasta el efecto que sobre la varianza residual tiene la asignación de cada uno de los casos, definiéndose como caso a cada tramo de línea ferroviaria, según los valores de todos los parámetros definidos anteriormente, a cada uno de los grupos. El valor mínimo de varianza determina una configuración de nuevos grupos con sus respectivas medias. Se asignan otra vez todos los casos a los nuevos centroides en un proceso que se repite hasta que ninguna transferencia puede ya disminuir la varianza residual, o se alcance otro criterio de parada, sea el número máximo de iteraciones o que la diferencia obtenida entre los centroides de dos pasos consecutivos sea menor que un valor prefijado.

El procedimiento configura los grupos maximizando la distancia entre los centros de gravedad. Como la varianza total es fija, minimizar la residual hace máxima la factorial o íntergrupos, y puesto que minimizar la varianza residual equivale a conseguir que sea mínima la distancia al cuadrado desde los casos a la media del cluster al que van a ser asignados, es esta diferencia euclídea al cuadrado la usada por el método.

La distancia euclídea al cuadrado, se calcula como:

$$d(i, j)^2 = \sum_k (x_{ik} - x_{jk})^2$$

Los casos se comprueban secuencialmente para ver su influencia, con lo que el orden de los mismos en la tabla puede afectar a la ordenación de

los grupos. El método muestra una solución final única con menos iteraciones en cuanto más cerca estén las medias de arranque de las que van a ser finalmente obtenidas. Inicialmente se hace la clasificación con un número elevado de grupos, detectándose los casos extremos de grupos con muy pocos elementos y la evolución de la integración de los elementos atípicos en los grupos mayores. El resultado obtenido son K clases o clusters con una única partición sin organización jerárquica ni relaciones entre ellos, pero con la mínima distancia entre los valores de sus parámetros y máxima similitud. En este método se le da la misma importancia a todos los parámetros volviéndose más decisivos los que tengan más variación en el total de casos estudiados.

El algoritmo de las K medias se compone de los siguientes pasos:

1. Seleccionar K clusters aleatorios y definir K centroides aleatorios.
2. Asignar cada elemento al cluster con el centroide más próximo.
3. Recalcular el centroide del cluster basándose en la asignación previa de los elementos.
4. Repetir los pasos 2 y 3 hasta que no haya nuevas reasignaciones.

El proceso se repite para diferentes K y el analista decide qué valor genera los clusters más adecuados.

Aunque existen algoritmos para optimizar el proceso de cálculo y utilizar centros de cluster pregenerados (Jain et al., 1999), no se han utilizado en el presente trabajo puesto que se podían generar fácilmente con el software SPSS. Se puede encontrar más información sobre K-means y otros algoritmos de clasificación en (Xu & Wunsch, 2005).

Se realizaron varias iteraciones de clusters, con diferente número de elementos, desde los casos más extremos que incluían muy pocos clusters y estudiando cómo se integraban los elementos atípicos en los clusters más grandes. Se decidió usar 6 clusters con partición directa sin organización jerárquica, pero con una distancia mínima entre elementos y similitud máxima.

Para evitar que la dimensión mayor dominara sobre las demás se normalizaron todas las medidas, algunas de ellas son cualitativas, por lo que la normalización es ponderada. Los parámetros analizados son los siguientes:

- Código de red.

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

- Kilómetros de vía.
- Tipo de vía.
- Velocidad máxima.
- Velocidad comercial.
- Tipo de carril.
- Tipo de traviesa.
- Tipo de línea aérea de contacto.
- Velocidad máxima LAC.
- Telemando.
- Tipo de bloqueo.
- Tipo de enclavamiento.
- Tipo de circuito de vía.
- Tren Tierra.
- Km de puentes.
- km de túneles.
- Número de estaciones.
- Incidencias año anterior.
- Incidencias 4 años anteriores.
- Incidencias de vía
- Incidencias de electrificación.
- km tren
- Toneladas brutas km

A la hora de normalizar los criterios se realizó de la siguiente manera:

Código Red: este código está definido por el Ministerio de Fomento en función de la importancia de la línea. Para asignarle un código a una línea esta debe cumplir con unos criterios técnicos definidos y en base a este criterio se realiza un mantenimiento más o menos intensivo.

Los tipos de línea posibles y su conversión paramétrica son los siguientes.

<i>Tipo de Línea</i>	<i>Conversión</i>
A	1
B	0.66
C	0.33
D	0

Tabla 4 3 Conversión tipo de línea.

Kilómetros de vía: este parámetro mide la longitud del tramo en kilómetros, sin considerar si es vía única o doble. Se ha parametrizado de forma lineal desde el máximo 1 (113,136 km) al mínimo 0,013178 (1,631 km), siendo la media 0,332 (37,56 km)

Tipo de vía: Este parámetro distingue si la vía es única o doble, dándole el valor 1 a vía doble y 0 a vía única. En los casos en los que el tramo es mixto, parte en vía doble y parte en vía única, se ha tomado un valor intermedio en función de la proporción de cada situación.

Velocidad máxima. Este parámetro es el que marca la máxima velocidad de diseño del tramo, que puede ser un mínimo de 70 km/h y un máximo de 220 km/h.

La conversión realizada ha sido la siguiente.

<i>Velocidad máxima</i>	<i>Conversión</i>
220 km/h	1
160-140 km/h	0.66
< 140 km/h	0.33

Tabla 4 4 Conversión velocidad máxima

Existen tramos con velocidades máximas más reducidas, en el entorno de 70/90 km/h, pero a los efectos de esta clasificación todos los tramos con velocidades por debajo de 140 km/h tienen un nivel de velocidad comercial tan bajo, que no resulta interesante separarlos entre sí. Cualquiera de ellos necesita grandes reformas antes de poder ser utilizable para explotaciones intensivas y/o rápidas.

Velocidad comercial: Este parámetro se ha modelado de la misma forma que la velocidad máxima.

Tipo de carril: El tipo de carril se clasifica según el peso por metro lineal del carril, ya que, aunque existen mejoras metalúrgicas estas son menores en comparación al tamaño del carril que marca su funcionamiento de forma dominante.

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

<i>Tipo de carril</i>	<i>Conversión</i>
60 kg/m	1
54 kg/m	0.66
<45 kg/m	0.33

Tabla 4 5 Conversión Tipo de carril

Tipo de traviesa: Las traviesas son los elementos que soportan el peso de los carriles de forma directa y el tipo de traviesa marca las características elásticas de la vía y su comportamiento y evolución geométrica con el tiempo.

<i>Tipo de traviesa</i>	<i>Conversión</i>
DW/PB (hormigón)	1
RS	0.5
Madera	0

Tabla 4 6 Conversión Tipo de traviesa

Tipo de línea aérea de contacto (LAC): Existen en ADIF dos tipos de línea aérea de contacto normalizadas, la CR-160 y la CR-220, diseñadas para velocidades máximas de 160 km/ y 220 km/h respectivamente. En las líneas con CR-160 algunas todavía cumplen estándares antiguos de CR-140 o incluso menores, pero se consideran indistintas al modelar el cumplimiento de los estándares. El efecto de la velocidad máxima se captura en otro parametro.

<i>Tipo de LAC</i>	<i>Conversión</i>
CR-220	1
CR-160 km/h	0.5
Sin LAC	0

Tabla 4 7 Conversión tipo de LAC

Velocidad máxima línea aérea de contacto: La velocidad máxima por LAC se modela de la misma forma que la línea aérea.

Telemando de energía: El telemando de energía no tiene situaciones intermedias, sino que solo existen si/no, con 1/0 respectivamente.

Tipo de bloqueo: Existen varios tipos de bloqueo posibles, y aunque no son desarrollos lineales, se ha tomado la siguiente modelación como adecuada.

<i>Tipo de bloqueo</i>	<i>Conversión</i>
BAB	1
BAD	0.66
BLAU/BAU	0.33
BT	0

Tabla 4 8 Conversión tipo de bloqueo

Tipo de enclavamiento: El tipo de enclavamiento se ha modelado de la siguiente manera, considerando el óptimo como enclavamiento electrónico:

<i>Tipo de enclavamiento</i>	<i>Conversión</i>
Electrónico	1
Grupos Geográficos	0.66
Cableado libre	0.33
Boure / No	0

Tabla 4 9 Conversión tipo de enclavamiento

Tipo de circuito de vía: Los circuitos de vía se han modelado de la siguiente manera:

<i>Tipo de Circuito de vía</i>	<i>Conversión</i>
Audiofrecuencia	1
50 Hz	0.75
Contadores de ejes	0.25
No	0

Tabla 4 10 Conversión circuito de vía

Tren tierra: El tren tierra no tiene situaciones intermedias, sino que solo existen si/no, con 1/0 respectivamente.

El resto de parámetros, al usar valores numéricos, medidos en km, número de incidencias, número de estaciones o similares, se han escalado en base a darle valor 1 al máximo de los tramos estudiados y escalar los demás.

En los casos en los que las instalaciones del tramo no son uniformes se ha ponderado el valor en un punto intermedio para definir la situación del parámetro.

Los tramos de la línea ferroviaria considerados son muy diferentes, ya que por ejemplo el tramo de Sagunto al puerto de Sagunto es muy diferente del Cullera-Gandia, en características de la vía, instalaciones, tráfico ferroviarios etc.

La tabla Tabla 4 11 nos muestra los cluster, o conglomerados, de líneas. 6 clusters es un número suficientemente grande para observar las diferencias entre las líneas y suficientemente pequeño como para que no haya microclusters ni clusters poco diferenciados entre sí. Para el proceso de comparación por pares es preferible operar con un número de clusters inferior a 7 (Saaty, 1980).

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

Número de caso	Tramo	Conglomerado	Distancia
1	FUENTE DE LA HIGUERA - MOGENTE	1	,434
2	MOGENTE - JATIVA	1	,942
3	BIF.VALLADA - BIF.L ALCUDIA	3	,795
4	JATIVA - SILLA	4	,998
5	SILLA - FACTORIA FORD	5	1,150
6	SILLA - VALENCIA TERMINO	3	,771
7	ALFAFAR-BENETUSSER - VALENCIA-FUENTE SAN LUIS	6	,762
8	VALENCIA TERMINO - SAGUNTO	2	,829
9	VALENCIA-FUENTE SAN LUIS - CLASIF.VALENCIA FTE.S.LUIS	6	,710
10	BIF.CLAS.VALENCIA FTE.S.LUIS - CLASIF.VALENCIA FTE.S.LUIS	6	,920
11	SAGUNTO - PUERTO DE SAGUNTO	5	1,162
12	SAGUNTO - ALMENARA	1	,531
13	ALMENARA - CASTELLON DE LA PLANA	4	,623
14	CASTELLON DE LA PLANA - OROPESA DEL MAR	1	1,024
15	LAS PALMAS - CASTELLON PUERTO	5	1,156

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

16	<i>OROPESA DEL MAR - VINAROS</i>	2	,829
17	<i>VINAROS - ULLDECONA</i>	1	,328
18	<i>ULLDECONA - L ALDEA AMPOSTA</i>	1	,300
19	<i>L ALDEA AMPOSTA - TORTOSA</i>	3	,722
20	<i>L ALDEA AMPOSTA - SALOU</i>	4	,882
21	<i>CAMPORROBLES - UTIEL</i>	5	,964
22	<i>UTIEL - BUNOL</i>	5	1,055
23	<i>BUNOL - VARA DE QUART</i>	4	1,199
24	<i>VARA DE QUART - QUART DE POBLET</i>	5	1,229
25	<i>JATIVA - ONTENIENTE</i>	5	,843
26	<i>ONTENIENTE - ALCOY</i>	5	,910
27	<i>SILLA - GANDIA</i>	4	,814
28	<i>GANDIA MERCANCIAS - GANDIA PUERTO</i>	6	,738
29	<i>SAGUNT - SONEJA</i>	5	,890
30	<i>SONEJA - CAUDIEL</i>	5	,815
31	<i>BADULES - SANTA EULALIA DEL CAMPO</i>	5	,925
32	<i>SANTA EULALIA DEL CAMPO - TERUEL</i>	5	,863
33	<i>TERUEL - BARRACAS</i>	5	1,098
34	<i>BARRACAS - CAUDIEL</i>	5	,790

Tabla 4 11 Agregación de clusters. Elaboración propia.

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

Los centros de los clusters se pueden ver en la Tabla 4 12

		Conglomerado					
		1	2	3	4	5	6
CODIGO RED PARAMETRICO		1	1	1	1	0	0
KMS VIA Parametrizado		,35013	,80462	,26019	,65695	,24478	,02181
TIPO VIA PARAMETRIZADO		,72222	,66666	,66666	,46666	,33333	,33333
VELOCIDAD PARAMETRIZADA		1	1	1	1	1	1
PUNTES PARAMETRIZADOS		,07976	,11252	,10844	,24261	,01964	,00000
TUNELES PARAMETRIZADOS		,16785	,03451	,00030	,00883	,06079	,00000
NUMERO DE ESTACIONES PARAMETRIZADO		,44444	,83333	,33333	,93333	,59523	,16666
TIPO CARRIL PARAMETRIZADO		1	1	1	1	0	1
TIPO TRAVIESA PARAMET		1	1	1	0	0	1

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

TIPO LAC PARAMET	1	1	0	0	0	0
TELEM ENERGIA	0	0	0	0	0	0
BLOQ.	1	1	1	1	0	1
ENCLAV	1	1	1	1	1	0
NUMERO DE PaN	0	0	0	1	0	0
TIPO DE CV	1	1	1	1	0	1
TREN TIERRA	1	1	1	1	1	0
INCIDENCIAS AÑO ANTERIOR	,23258	,88700	,04143	,77514	,11057	,02824
INCIDENCIAS 4 AÑOS ANTERIORES	,25200	,69133	,09822	,56800	,09495	,06466
INCIDENCIAS DEBIDO A SEÑALIZACION	,21923	,79865	,03803	,75436	,08772	,02013
INCIDENCIAS DEBIDAS A ELECTRIFICACION	0	1	0	1	0	0
INCIDENCIAS DEBIDAS A VIA	0	1	0	0	0	0
KM TREN PARAMETRIZADAS	,78840	,99226	,71319	,98189	,25346	,06162
TM BRUTAS TRANSPORTE PARAMETRIZADAS	,87106	,99873	,72599	,93563	,17649	,10610

Tabla 4 12 Centros de los conglomerados finales

4.4.3. Identificación y agrupación de criterios según el modelo ANP-BC

El modelo jerárquico ya permitía obtener unos resultados interesantes, pero se detectó que existían relaciones entre los criterios y que la jerarquía no era capaz de capturarla de forma suficientemente eficaz, por lo que se pasó a un modelo en red.

Una evolución del modelo AHP pasó a convertirse en un modelo ANP-BC, en la que, los mismos criterios utilizados en el modelo AHP se disgregan en dos subredes, una de beneficios y otra de costes, donde, además de las relaciones ya creadas en el modelo AHP se han incluido las relaciones entre criterios para convertir la jerarquía en una red. Las categorías existentes y sus ponderaciones se mantienen.

Ese modelo mostró principalmente que los criterios que aumentaban la funcionalidad de las instalaciones, ganaban influencia frente a los que generaban beneficios indirectos, como por ejemplo la automatización de rutas y bloqueos que perdían influencia frente a la reducción del número de incidencias, la mejora de la capacidad o la reducción del cantón crítico.

Se expone a continuación los elementos del modelo en red.

Subred de Costes: Formada por los grupos de criterios:

- Grupo 3 CET. Criterios de eficiencia técnica.
- Grupo 6 CEE. Criterios de eficiencia económica.
- Grupo 7. CTV. Criterio tramo de vía.

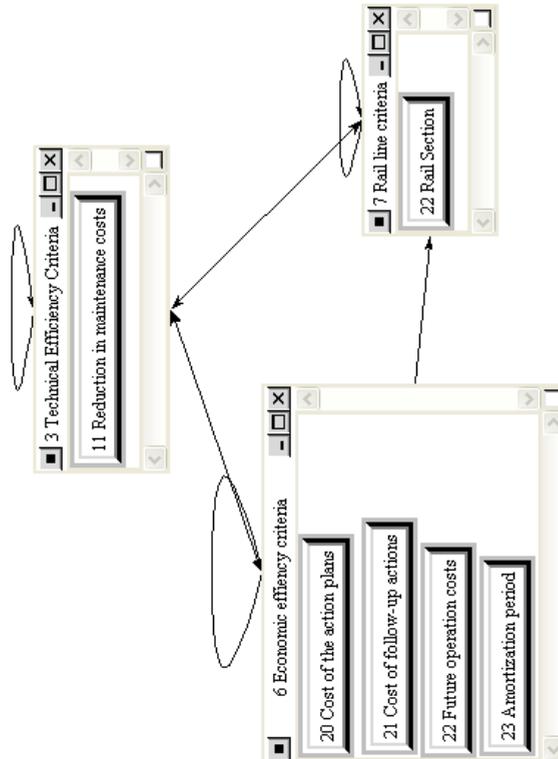


Figura 4 4. Subred de Costes ANP-BC.

Subred de Beneficios: formada por los grupos de criterios:

- Grupo 1 CSC. Criterios de seguridad en la circulación.
- Grupo 2 CSE. Criterios de eficiencia en la explotación.
- Grupo 3 CET. Criterios de eficiencia técnica.

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

- Grupo 4 CUS. Criterios de uso social.
- Grupo 5 CSA. Criterios de sostenibilidad ambiental.

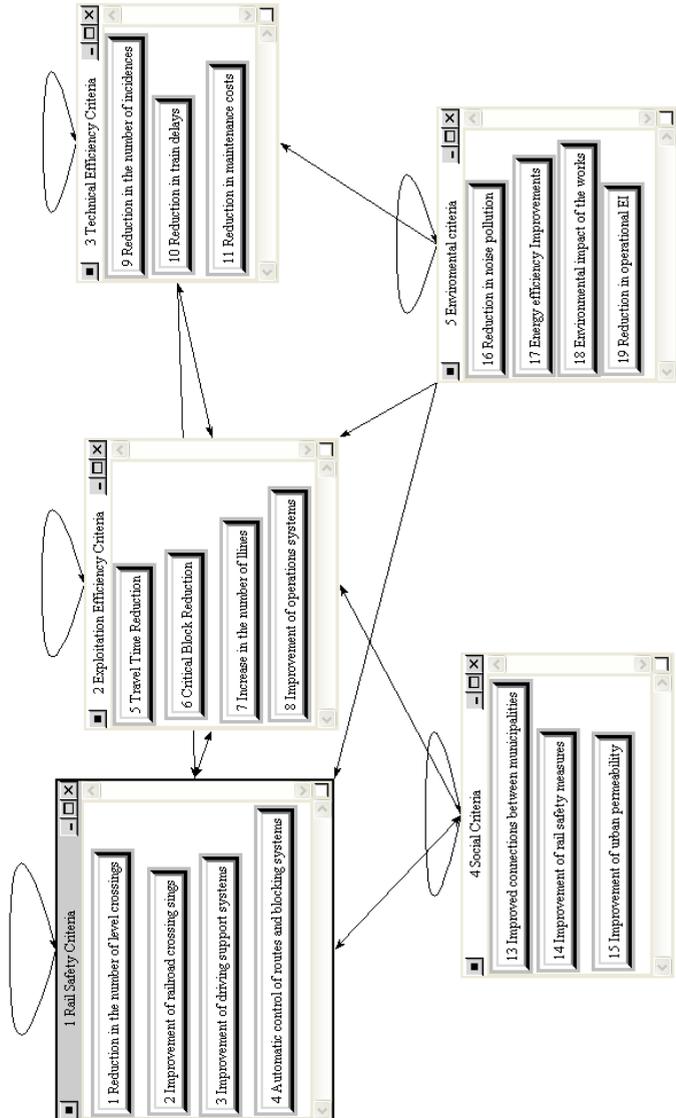


Figura 4 5 Subred de Beneficios ANP-BC

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

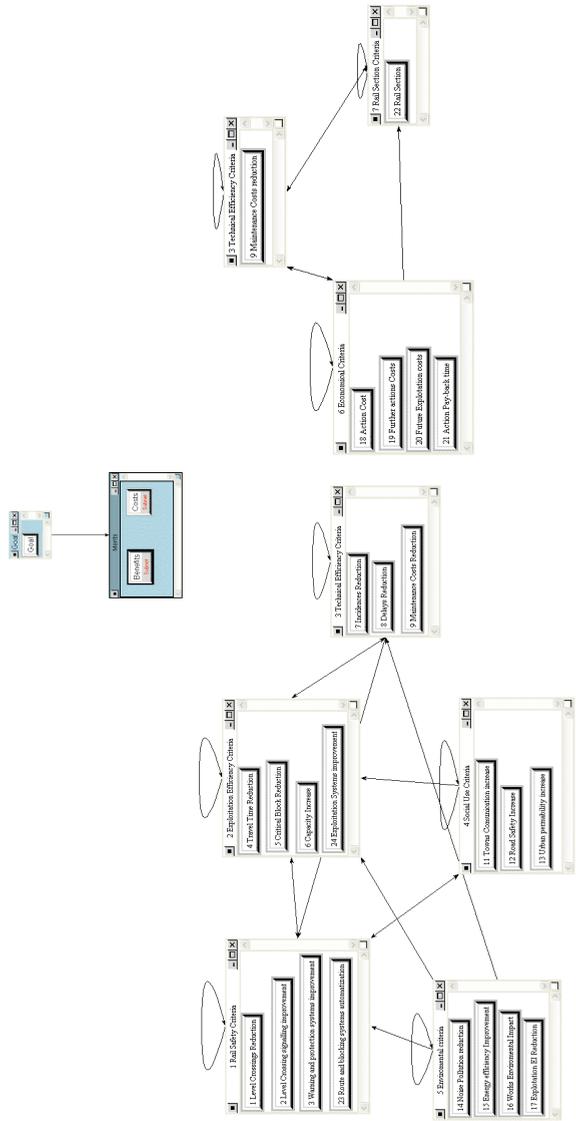


Figura 4 6 Modelo ANP-BC

4.4.4. El modelo ANP-BOCR.

La siguiente fase consistió en la transformación del modelo ANP-BC a un modelo ANP-BOCR. Esto implicó la revisión en profundidad de todos los criterios y sus relaciones, desarrollándose una nueva variante en la que desaparecían algunos criterios y entraban otros, pasando de 24 a 26 criterios. Analizando los modelos anteriores, se observó que el criterio de tramo de línea tenía mucho peso, pero no reflejaba bien la situación de cada línea, ya que gran parte de los factores utilizados para evaluar las alternativas respecto a este criterio de agrupación no eran relevantes. Tan solo parte de los factores utilizados tenían influencia real para definir el tipo de línea. Los cambios se deben principalmente a la desaparición del criterio definido por la agrupación en K-Medias y su descomposición en varios criterios, basados en las características fundamentales que definían los diferentes tramos de líneas y que permiten una comparación más sencilla por parte de los decisores, manteniendo las variables fundamentales que caracterizan a los diferentes tipos de línea en la valoración de las alternativas.

Como nuevos criterios han surgido los siguientes, que se definen en detalle en el siguiente apartado:

- CTV.C11 kmtren/km
- CTV.C12 PaN en la línea.
- CTV.C13 Velocidad de la línea
- CTV.C14 Nivel de señalización
- CTV.C18 Retrasos/km
- CTV.C19 Retrasos/kmtren
- CTV.C20 Incidencias/km
- CTV.C21 Incidencias/kmtren
- CEE.C24 Coste de mantenimiento futuro
- CVP.C25 Desviación en coste
- CVP.C26 Desviación en resultados

Los criterios que han desaparecido son:

- CTV.C33 Tramo de línea
- CUS.C26 Mejora de las comunicaciones entre los municipios.
- CUS.C27 Mejora de la permeabilidad urbana.

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

- CET.C25 Mejora de la diagnosis de los equipamientos.
- CEE.C28 Tiempo de amortización de la actuación.
- CSA.C29 Reducción de los contaminación acústica.
- CSA.C30 Mejora de la eficiencia energética.
- CSA.C31 Reducción Impacto ambiental durante la actuación.
- CSA.C32 Reducción Impacto ambiental del FFCC.

Con estos cambios, los grupos de criterios y su asignación a cada una de las subredes se puede ver en la Figura 4 7.



Figura 4 7. Grupos de criterios considerados agrupados por subredes.
Elaboración propia.

4.5. Criterios del modelo ANP-BOCR.

4.5.1. CSC Criterios de seguridad en la circulación.

Los criterios de seguridad en la circulación describen el efecto de la actuación sobre la seguridad en la circulación del tramo en estudio. La seguridad en la circulación se divide en dos grandes campos, seguridad en la explotación y el funcionamiento de los trenes y la seguridad de las personas por el efecto del ferrocarril. El alcance y definición de la seguridad ferroviaria se puede ver en la Directiva de seguridad Ferroviaria de la UE (Directiva 2004/49/CE).

La seguridad en la explotación la dan todas las actuaciones que reduzcan la posibilidad o la gravedad de un malfuncionamiento del tren que pueda provocar un descarrilamiento o un choque entre trenes. La seguridad de las personas por el efecto del ferrocarril se emplaza principalmente en el campo de los arrollamientos, donde cualquier actuación que reduzca las posibilidades de arrollamiento en la vía, de forma pasiva o activa, tanto en un paso a nivel como en cualquier otro lugar de la red, tendrá una actuación positiva sobre este criterio.

Los subcriterios desarrollados son:

CSC.C1.- Reducción del número de pasos a nivel.

Ya comentado antes.

CSC.C2.- Mejora de la señalización de pasos a nivel.

Ya comentado antes.

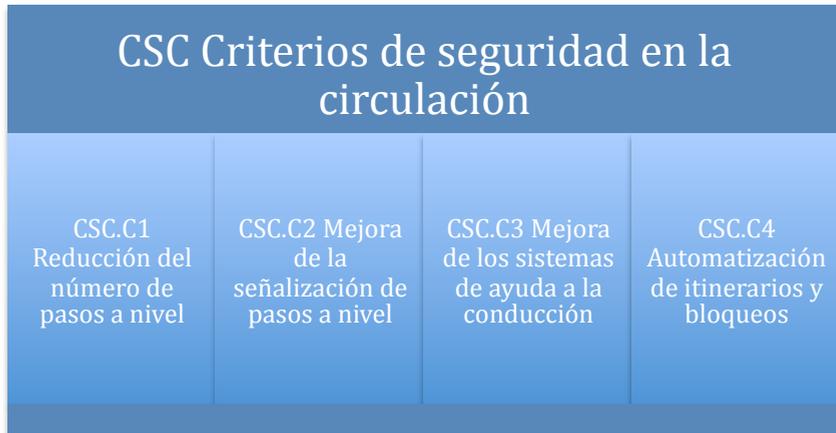
CSC.C3.- Mejora de los sistemas de ayuda a la conducción.

Ya comentado antes.

CSC.C4.- Automatización de Itinerarios y bloqueos.

Ya comentado antes.

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.



4.5.2. CSE Criterios de eficiencia en la explotación.

Estos criterios describen el efecto de las actuaciones que permitan aumentar el número de trenes/pasajeros que usan la red debido a mejoras técnicas o de gestión, así como la reducción del coste energético del transporte. No se tienen en cuenta medidas que afecten al material móvil ni a las estaciones en cuanto a su accesibilidad ni accesos desde los núcleos urbanos.

Dentro de estos criterios se considera la reducción del consumo de energía, la reducción de los tiempos de desplazamiento, reducciones de los cuellos de botella y optimización de la red y de su uso. Se tiene en cuenta tanto el funcionamiento de la instalación durante la actuación como una vez finalizada esta.

CSE.C5.- Reducción de los tiempos de viaje.

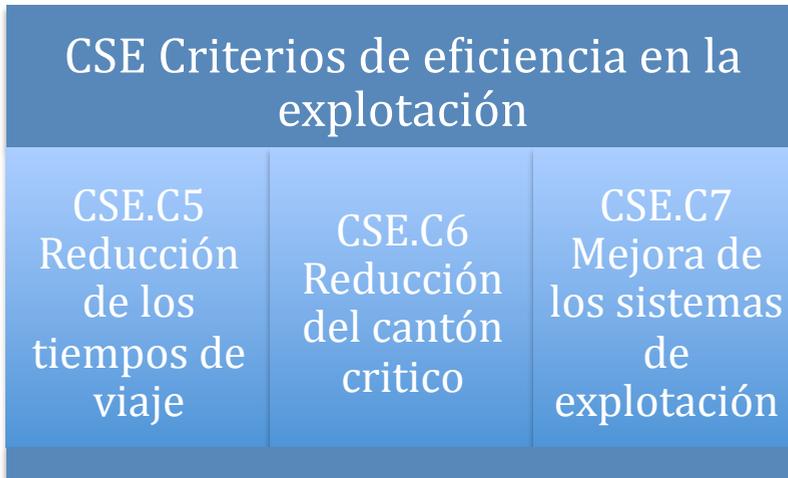
Ya comentado antes.

CSE.C6.- Reducción del cantón crítico.

Ya comentado antes.

CSE.C7.- Mejora de los sistemas de explotación.

Ya comentado antes.



4.5.3. CET Criterios de eficiencia técnica.

Este grupo de criterios engloba a todos los factores, que aunque no impliquen un cambio en la operación realizada por la instalación, permiten que esta realice su función más adecuadamente, como por ejemplo, todos los cambios que permiten reducir el número de actuaciones de mantenimiento correctivo, que alarguen la vida útil de los equipos instalados y que faciliten la diagnosis y el mantenimiento preventivo de las instalaciones. Dentro de estos criterios se valora también las ganancias en fiabilidad del sistema en situaciones degradadas, y en general, todo lo que posibilite que el sistema funcione al máximo nivel de calidad durante el mayor tiempo posible al mínimo costo. En (Huisman & Boucherie, 2001) se estudia el efecto de las averías sobre la capacidad real en condiciones de trenes heterogéneos y el aumento de los retrasos al haber circulaciones heterogéneas frente a redes homogéneas.

Los criterios considerados son:

CET.C8.- Reducción en el número de incidencias.

Este criterio evalúa la reducción en el número de incidencias anuales que generaría la actuación. El número de incidencias penaliza el funcionamiento de la instalación, aunque sean menores y de poca importancia, ya que implican un alto coste de oportunidad, porque

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

suponen el desplazamiento de personal operativo para la actuación correctiva, desplazándose de sus funciones de preventivo y dejando de estar disponibles para otra actuación correctiva. Por ello, cualquier actuación que permita reducir el número de incidencias, tanto menores como graves, mejora los tiempos de respuesta y la productividad del mantenimiento preventivo.

Las categorías consideradas son las siguientes:

- Mayor 50%: Se reduce el número de incidencias en un 50% o más.
- Mayor 20%: Se reduce el número de incidencias en un 20% o más.
- Mayor 10%: Se reduce el número de incidencias en un 10% o más.
- Menor 1%: Se reduce el número de incidencias en menos de un 1%, los cambios son mínimos.
- Aumento: El número de incidencias aumenta.

CET.C9.- Reducción de los retrasos.

Ya comentado antes.



4.5.4. CUS Criterios de utilidad social.

Dentro de este grupo de criterios se considera el efecto que tienen las actuaciones sobre la utilidad social de la red ferroviaria, en su función de comunicación de núcleos de población y el efecto del ferrocarril sobre la estructura de las ciudades. Dentro de la utilidad social, se podría considerar el efecto del cambio de las frecuencias y tiempos de viaje, ya que como se muestra en (Fitzroy et al., 1995), es uno de los componentes claves para aumentar la demanda de transporte por ferrocarril. Aunque estos criterios se contemplaron en el modelo AHP y ANP-BC, se han eliminado del modelo por no tener pesos relevantes. (Laird et al., 2009) evalúan los beneficios, la utilidad social, para los no usuarios de una infraestructura de transporte, aunque, al nivel de decisiones estudiado en este trabajo no es relevante. El único criterio que se ha considerado significativo y se ha incluido en este trabajo es la seguridad vial, como parte de la seguridad externa al ferrocarril que sí ha de contemplarse.

CUS.C10.- Mejora de la seguridad vial del entorno.

Ya comentado antes.

CUS Criterios de utilidad social

CUS.C10 Mejora de la
seguridad vial del
entorno

4.5.5. CTV Criterios de categoría de línea.

En los modelos previos se contempló la agrupación de las características de las líneas ferroviarias para intentar generar unas categorías de líneas con importancia similar a la hora de priorizar los proyectos. Con ese enfoque se obtuvieron unas agrupaciones de tramos similares por K-medias, tal y como ya se ha comentado.

En este modelo se ha enfocado de forma diferente, en base a los resultados obtenidos, para, de una forma más sencilla que la anterior, obtener una priorización eficaz.

De esta forma se han definido los siguientes criterios.

CTV.C11.-Kmtren/km

Este parámetro mide el número de kilómetros que recorre un tren en el tramo, dividido por el número de kilómetros del tramo. Es una medida indirecta, ya que el valor de kmtren es conocido y calculado para gestionar el mantenimiento de los trenes y el cobro de los cánones al operador. La combinación de ambas variables permite obtener el uso que se le da a la infraestructura. En este trabajo se han utilizado los datos publicados del año 2007, los últimos disponibles cuando se comenzó el trabajo. Los valores disponibles se han normalizado linealmente, dándole valor 1 al máximo de la zona estudiada.

Las categorías consideradas son:

- Muy alto. Cuando el valor supera 0,85.
- Alto. Cuando el valor esta entre 0,6 y 0,85.
- Medio. Cuando el valor esta entre 0,3 y 0,6.
- Bajo. Cuando el valor esta entre 0,1 y 0,3.
- Muy Bajo. Cuando el valor es inferior a 0,1.

CTV.C12.- Pasos a nivel en la línea.

La presencia o no de pasos a nivel (PaN) es un condicionante del nivel de prestaciones que puede otorgar la línea y suelen ser una fuente de incidencias importante. Por un lado la interacción entre tráfico viario y ferroviario siempre genera averías e interferencias, y por otro lado, es una instalación de seguridad muy sensible y que genera múltiples averías por su propia sensibilidad, como todos los elementos de seguridad intrínseca. Uno de los objetivos declarados a medio plazo del ADIF es la

eliminación total de los PaN en sus instalaciones, llevándose muchos años sin ponerse ninguno en servicio y estando en una campaña de eliminación muy intensa. Las líneas de AV y cualquier nueva variante que se construye no tiene PaN.

Las categorías consideradas son:

- Más de 5. Cuando un tramo tiene más de 5 PaN, se considera que los PaN adicionales no generan cambios en los resultados. Se considera que la categoría está saturada y mientras se mantenga por encima de este umbral seguirá así.
- Más de 3. Entre 3 y 5 PaN se considera que la situación es alta y que el número de PaN marca mucho las características de la línea.
- Al menos 1. Entre 1 y 3 PaN se considera que la situación es normal y que pese a tener su importancia, la situación no es demasiado dañina para el desempeño del tramo.
- Ninguno. Los tramos sin PaN son los menos sensibles por razones obvias y el objetivo a largo plazo del ADIF es que todos los tramos sean así. Es el nivel óptimo de Pasos a nivel del tramo.

CTV.C13.- Velocidad de la línea.

La velocidad nominal de la línea; la máxima velocidad en este tramo sin tener en cuenta limitaciones específicas por puntos singulares (curvas, puentes, zonas en mal estado) nos marca el nivel de calidad esperable de la línea y es un indicador directo del nivel de prestaciones que se espera de ella. La velocidad de la línea afecta a la capacidad máxima y al tiempo de recuperación frente a una incidencia. Los tramos con velocidades inferiores a las que puede conseguir el material móvil limitan el desempeño de la red en condiciones nominales y su capacidad de recuperación frente a incidencias. Como describen (Ieda et al., 2001) la congestión y el tiempo de viaje están fuertemente asociados con el nivel de insatisfacción del transporte.

Las categorías consideradas son:

- Más de 200 km/h.
- Más de 160 km/h.
- Más de 140 km/h.
- Más de 120 km/h.
- 100 km/h o menos.

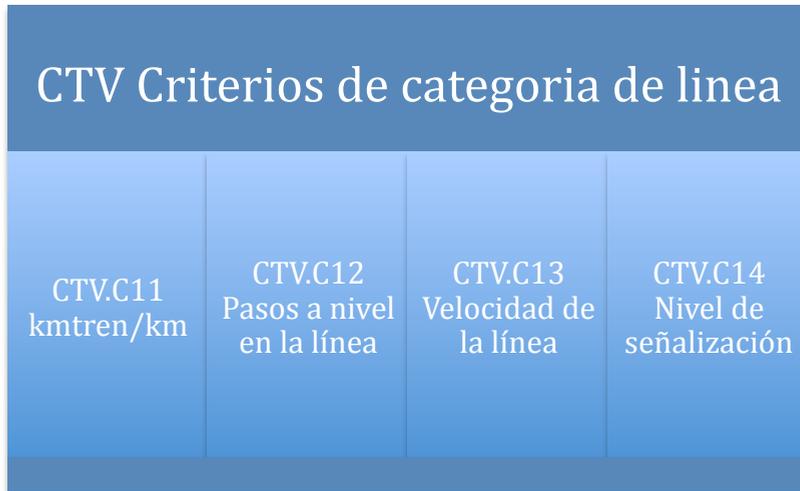
CTV.C14.- Nivel de señalización.

Como nivel de señalización en este trabajo se ha considerado el tipo de mecanismo de señalización de bloqueo empleado. El bloqueo es el sistema de gestión del tráfico entre dos estaciones. El tipo de sistema de bloqueo marca el límite práctico de la capacidad de la línea y el máximo número de circulaciones que es posible. El tipo de bloqueo también nos marca la capacidad de reponerse frente a una incidencia. Cuanto más avanzado es un sistema de bloqueo, mayor es la capacidad de la línea y mayor es su robustez frente a incidencias, como puede verse en (Abril et al., 2008).

Las categorías consideradas son:

- ERTMS y BSL. El nivel más avanzado de señalización disponible en España. Es el utilizado en la red de Alta Velocidad y se está implantando en las redes de cercanías. Declaración de la red de ADIF. Permite el máximo número de circulaciones con el máximo nivel de seguridad.
- BAB/BAU. Bloqueo Automático Banalizado y Bloqueo Automático en Vía Única. Es el nivel más avanzado sin tecnologías de ATP digitales (Automatic Train Protection) excluyendo el ASFA. Permite sucesiones de trenes en el mismo sentido y tiene la misma capacidad por ambas vías en ambos sentidos. El BAU es la versión de vía única.
- BAD. Bloqueo Automático de vía doble. Más sencillo que el BAB, solo tiene señalización en el sentido de circulación preferente, no permite sucesiones de trenes en sentido no preferente.
- BLAU. Bloqueo de Liberación Automático de vía única. Más sencillo que el BAU, no permite sucesión de trenes en el mismo sentido, cantón único entre estaciones, tiene las instalaciones mínimas necesarias.
- Ninguno. En las líneas con CCR (control de Circulación por Radio) o con BT (Bloqueo telefónico) no existen instalaciones específicas de señalización, con lo que la capacidad es mínima y la seguridad es inferior a los sistemas automáticos.

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.



4.5.6. CMU Criterios de mejora de utilidad.

Este grupo de criterios muestra el nivel de uso de la línea y su estado de saturación, mostrando la influencia de las características de estas sobre las circulaciones existentes.

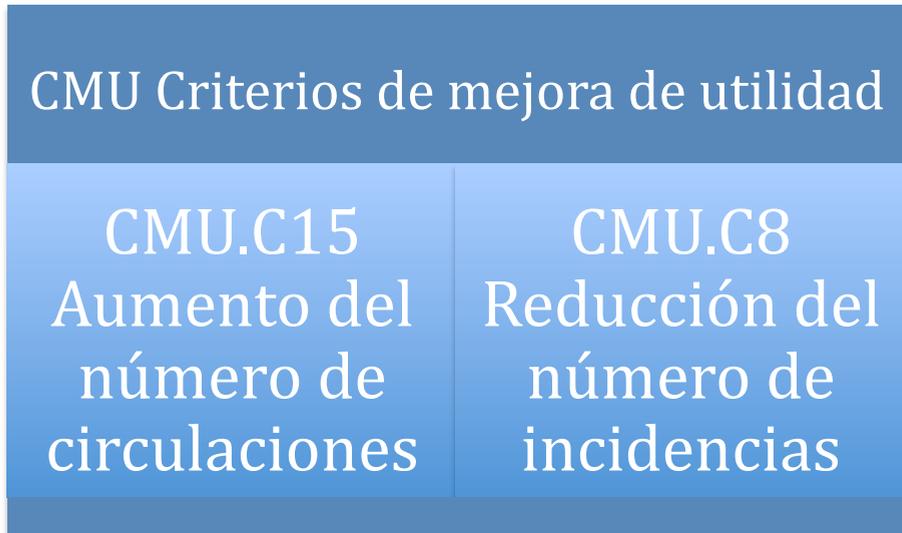
CMU.C15.- Aumento del número de circulaciones.

Ya comentado antes.

CMU.C8.- Reducción en el número de incidencias.

Ya comentado antes.

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.



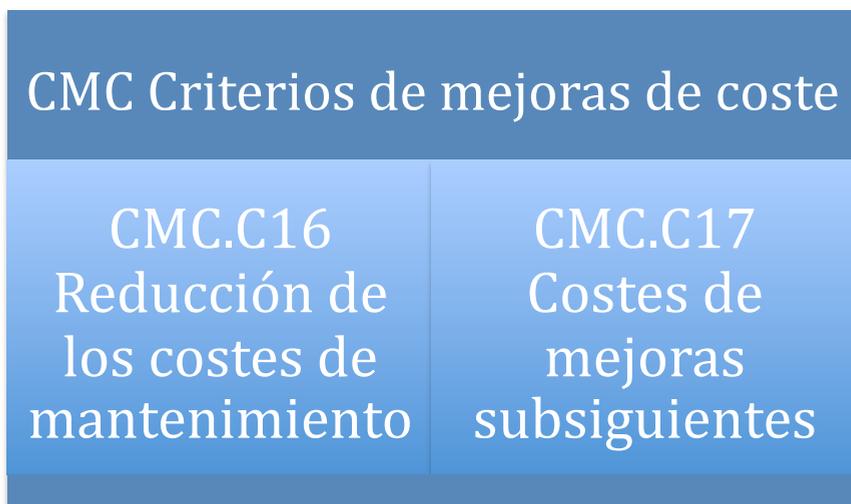
4.5.7. CMC Criterios de mejoras de Coste.

CMC.C16.- Reducción de los costes de mantenimiento.

Ya comentado antes.

CMC.C17.- Coste de mejoras subsiguientes.

Ya comentado antes.



4.5.8. CML Criterios de mejora de la línea.

CML.C18.- Retrasos/km.

Este criterio permite incluir el número de retrasos debidos a la infraestructura, medidos en minutos de retraso a los trenes, dividido por el número de kilómetros del tramo, para poder evaluar la cantidad de retrasos de los diferentes tramos entre sí.

Este criterio es fundamental porque muestra el comportamiento de la infraestructura frente al uso que se le está dando actualmente. Los retrasos en los trenes son uno de los principales parámetros de calidad percibidos por los clientes. Por ejemplo, (Asensio & Matas, 2008) evalúan el coste de la variabilidad en los tiempos de viaje para viajeros en el área de Barcelona y encuentran que el coste percibido de cada unidad de tiempo de variabilidad es de 3,6 a 1,5 veces mayor que cada unidad de tiempo de viaje. Además, como se indicó en su apartado, es uno de los objetivos de gestión de ADIF. Los valores se han normalizado, siendo 1 el valor máximo y los demás descienden linealmente hasta cero.

Las categorías consideradas son las siguientes.

- Muy alto. Cuando el valor supera 0,4.
- Alto. Cuando el valor esta entre 0,4 y 0,15.
- Medio. Cuando el valor esta entre 0,15 y 0,10.
- Bajo. Cuando el valor esta entre 0,10 y 0,05.
- Muy Bajo. Cuando el valor es inferior a 0,05.

CML.C19.- Retrasos/kmtren.

Para tener en cuenta el número de circulaciones y si los retrasos generados son debidos a muchas circulaciones o a pocas, se ha incluido este criterio que permite detectar los tramos donde los retrasos sean muy altos en relación al número de circulaciones. Esto indicaría un comportamiento especialmente deficiente de la infraestructura o alguna deficiencia puntual significativa. Los valores están normalizados linealmente a 1 en el máximo y 0 en el mínimo.

Las categorías consideradas son las siguientes.

- Muy alto. Cuando el valor supera 0,4.
- Alto. Cuando el valor esta entre 0,4 y 0,15.

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

- Medio. Cuando el valor esta entre 0,15 y 0,10.
- Bajo. Cuando el valor esta entre 0,10 y 0,05.
- Muy Bajo. Cuando el valor es inferior a 0,05.

CML.C20.- Incidencias/km.

De forma similar a los retrasos, el número de incidencias es otro indicador clave del comportamiento de una infraestructura; además es uno de los indicadores que se marca ADIF como objetivo de gestión.

El número de incidencias por kilómetro muestra el nivel de desgaste al que está sometida la infraestructura y el nivel de calidad que tiene, ya que unas instalaciones de baja calidad (para su nivel de uso) tendrán muchas incidencias. Las incidencias no son solo por causas internas sino que hay muchos factores externos implicados (obras en el entorno, climatología, robos, etc.) Los valores están normalizados linealmente a 1 en el máximo y 0 en el mínimo.

Las categorías consideradas son las siguientes.

- Muy alto. Cuando el valor supera 0,4.
- Alto. Cuando el valor esta entre 0,4 y 0,15.
- Medio. Cuando el valor esta entre 0,15 y 0,10.
- Bajo. Cuando el valor esta entre 0,10 y 0,05.
- Muy Bajo. Cuando el valor es inferior a 0,05.

CML.C21.- Incidencias/kmtren.

Las incidencias no se deben solo a factores ligados a la longitud de la línea, sino que están ligadas también al uso que se les da (Montesinos Valera, 2011). Cuantas más circulaciones pasen por un tramo más crece el número de incidencias. Por ello, además de incidencias por kilómetro se ha incluido el número de incidencias por kmtren para así separar los tramos de alta utilización con un nivel bajo de incidencias por circulación de los de baja circulación con muchas incidencias. Este parámetro y el anterior son independientes, puesto que por un lado interesa bajar el nivel basal de incidencias de todos los tramos y por otro reducir el número de incidencias en los tramos más conflictivos. Los valores se han normalizado linealmente a 1 en el máximo.

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

Las categorías consideradas son las siguientes.

- Muy alto. Cuando el valor supera 0,4.
- Alto. Cuando el valor esta entre 0,4 y 0,15.
- Medio. Cuando el valor esta entre 0,15 y 0,10.
- Bajo. Cuando el valor esta entre 0,10 y 0,05.
- Muy Bajo. Cuando el valor es inferior a 0,05.

CML Criterios de mejora de la línea			
CML.C18 Retrasos/ km	CML.C19 Retrasos/ kmtren	CML.C20 Incidencias/ km	CML.C21 Incidencias/ kmtren

4.5.9. CEE Criterios de eficiencia económica.

Con este grupo de criterios compararemos el coste que implica la actuación, tanto en explotación como en ejecución, valorando la influencia en el coste de otras mejoras futuras.

CEE.C22.- Coste de la actuación de mejora.

Ya comentado antes.

CEE.C23.- Coste de explotación futura.

Ya comentado antes.

CEE.C24.- Coste de Mantenimiento futuro.

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

De forma similar al coste de explotación, el coste de mantenimiento futuro también es importante, pues permite conocer cómo cambian las condiciones de mantenimiento de la línea una vez implementadas las actuaciones evaluadas. Se consideran de forma separada porque es posible realizar actuaciones que no afecten a la capacidad del tramo pero que si faciliten o dificulten el mantenimiento.

Las categorías consideradas son:

- Mayor 120%: El coste de mantenimiento futuro es mayor al 120% del coste actual.
- Mayor 100%: El coste de mantenimiento futuro es mayor al 100% del coste actual.
- Mayor 80%: El coste de mantenimiento futuro es mayor al 80% del coste actual.
- Menor 80%: El coste de mantenimiento futuro es menor al 50% del coste actual.



4.5.10. CVP Criterios de variación de proyecto.

Los criterios considerados en este apartado tienen en cuenta la madurez del tipo de proyecto a realizar y la posibilidad de que ese proyecto tenga desviaciones importantes, según la experiencia del decisor.

CVP.C25.- Desviación en coste.

En este criterio se considera la desviación esperable en el coste de ejecución con respecto al previsto. No se considera como cierta la desviación pero sí posible. Con este criterio se intenta medir la incertidumbre en el desarrollo del proyecto. Cuanto más complejo sea este, más posibilidades de tener grandes desviaciones. (Cantarelli, Molin, van Wee, & Flyvbjerg, 2012) han estudiado el origen de los sobrecostes en proyectos de transporte en Holanda, donde han descubierto que casi todo el sobrecoste se produce en las fases previas a la construcción y que los proyectos pequeños suelen tener sobrecostes mayores (en porcentaje). (Özgür, 2011) estudia los resultados de los proyectos de ferrocarril ligero en Turquía (Ankara, Bursa, Izmir y Estambul) para estimar las desviaciones en coste y resultados de los proyectos una vez en servicio, para estudiar sus causas.

Las categorías consideradas son:

- Mayor del 100%. La desviación esperable en coste es mayor del 100% del presupuesto.
- Mayor del 70%. La desviación esperable en coste es mayor del 70% del presupuesto.
- Mayor del 50%. La desviación esperable en coste es mayor del 50% del presupuesto.
- Mayor del 20%. La desviación esperable en coste es mayor del 20% del presupuesto.
- Menor del 20%. La desviación esperable en coste es menor del 20% del presupuesto.

CVP.C26.- Desviación en resultados.

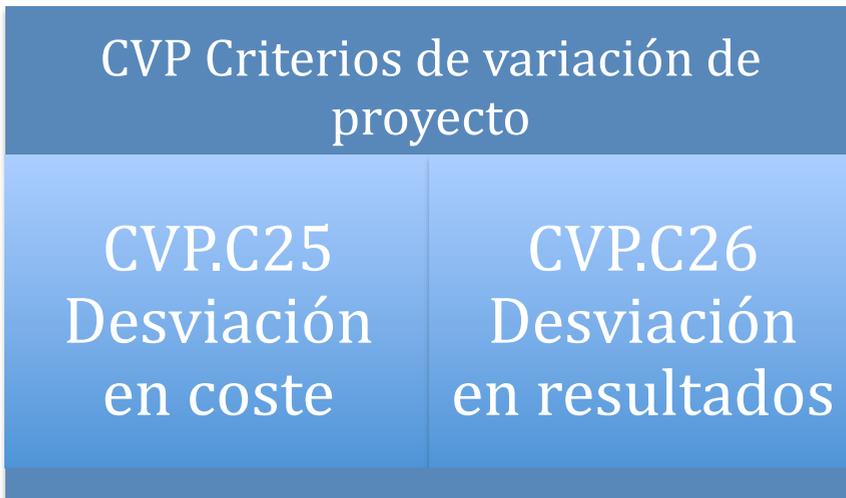
Con este criterio, de forma similar al anterior, se evalúa la complejidad de obtener los resultados previstos. Cuanto más complejo es un proyecto y más depende de factores no controlables o externos a la obra en sí, mayor será la desviación esperable en los resultados. (Özgür, 2011) muestra que ninguno de los cuatro proyectos evaluados en su trabajo ha cumplido completamente las expectativas iniciales, (Giezen, 2012) y (Cantarelli et al., 2012) también analizan los factores que aumentan la complejidad del proyecto y aumentan las probabilidades de desviación en resultados,

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

llegando a la conclusión que la desviación crece con la complejidad del proyecto, tanto técnica como de gestión.

Las categorías consideradas son:

- Mayor del 70%. La desviación negativa es mayor del 75% de la mejora prevista.
- Mayor del 50%. La desviación negativa es mayor del 50% de la mejora prevista.
- Mayor del 25%. La desviación negativa es mayor del 25% de la mejora prevista.
- Mayor del 10%. La desviación negativa es mayor del 10% de la mejora prevista.
- Menor del 10%. La desviación negativa es menor del 10% de la mejora prevista.



4.5.11. CUF Criterios de uso futuro.

Dentro de este grupo considerado en la red de Riesgos, solo se incluye el criterio de costes futuros de mantenimiento, ya definido en el apartado 4.5.9, con lo que no es necesario volver a definirlo.

CUF Criterios de uso futuro

CUF.C24 Coste de mantenimiento futuro

4.6. Agrupación de los datos.

A la hora de relacionar todos estos criterios entre sí y con los nodos de nivel superior, se han de definir las relaciones de influencia entre ellos. (Saaty & Shih, 2009) considera que la forma de agrupar las redes y las jerarquías es la base de una adecuado modelado del problema de decisión.

Para la solución final de este trabajo se ha decidido utilizar el modelo en red, el proceso analítico en red (ANP), para relacionar todos los criterios y las alternativas entre sí.

Ante la complejidad del problema de decisión planteado se ha adoptado el modelo más desarrollado de ANP, el ANP-BOCR. Con este tipo de red se plantean 4 subredes, priorizadas entre sí, siendo cada una de ellas la red de Beneficios, de Oportunidades, de Costes y la de Riesgos.

Ante la cantidad de alternativas previstas, el análisis de alternativas entre sí y con los criterios era tremendamente tedioso, con un número de comparaciones imposible de realizar e imposible de afinar por los decisores. Por ello se decidió adoptar el uso de categorías (Saaty, 2008a) que permite definir una alternativa en función de su categoría para cada criterio. Las categorías son ideales, en cuanto que se pondera el valor de

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

la mejor alternativa en 1 y los demás como fracciones. Se ha hecho así para independizar las alternativas entre sí, por considerarse que las alternativas no se influyen unas sobre otras y que la existencia de alternativas irrelevantes no afecta a la priorización de las demás. Esta consideración se basa en las condiciones específicas del caso de estudio. En otros ámbitos es posible que hubiera que considerarlo de otra forma.

Capítulo 5

Ponderación de criterios, valoración de alternativas y priorización

En este capítulo se describen los siguientes pasos del método que se pueden resumir en:

- Ponderación de los criterios. Cálculo de los pesos relativos de todos los criterios entre sí, que nos muestran la importancia que le da el decisor a cada uno de los criterios. Para ello se han considerado los tres modelos descritos en el Capítulo 4: modelo Jerárquico, modelo en red BC y en red BOCR.
- Valoración de las alternativas para cada uno de los criterios mediante la aplicación de la técnica de ratings descrita en el Capítulo 3. Se ha decidido utilizar esta técnica debido a la cantidad de alternativas que se han identificado en el Capítulo 4.
- La priorización agregada de la cartera de proyectos según cada uno de los tres modelos descritos.
- Análisis de resultados
- Análisis de sensibilidad.

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

5.1. Ponderación de criterios. Modelo Jerárquico (AHP)

En este apartado se muestra la ponderación de los criterios siguiendo el modelo jerárquico (AHP). Los dos decisores, actuando por consenso, respondieron al correspondiente cuestionario mediante el cual emitieron los juicios necesarios para realizar las comparaciones pareadas que requiere el método AHP. En el anexo 3 se incluye un ejemplo de este tipo de cuestionario.

Las ponderaciones obtenidas se muestran en la Tabla 5 1

<i>Grupo de criterios</i>	<i>Criterio</i>	<i>Ponderación local</i>	<i>Ponderación global</i>
CSC. Criterios de Seguridad en la circulación $w_{CSC} = 0.4353$	CSC.C1.- Reducción del número de pasos a nivel.	0.3783	0.1646
	CSC.C2.- Mejora de la señalización de pasos a nivel.	0.0714	0.0311
	CSC.C3.- Mejora de los sistemas de ayuda a la conducción.	0.2751	0.1197
	CSC.C4.- Automatización de Itinerarios y bloqueos.	0.2751	0.1197
CSE. Criterios de Eficiencia en la explotación. $w_{CSE} = 0.1818$	CSE.C5.- Reducción de los tiempos de viaje.	0.5162	0.0938
	CSE.C6.- Reducción del cantón crítico.	0.2838	0.0516
	CSE.C15.- Aumento del número de circulaciones.	0.1626	0.0295
	CSE.C7.- Mejora de los sistemas de explotación.	0.0373	0.0068
CET. Criterios de Eficiencia Técnica. $w_{CET} = 0.1239$	CET.C8.- Reducción en el número de incidencias.	0.6395	0.0792
	CET.C9.- Reducción de los retrasos.	0.2575	0.0319

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

	CET.C16.- Reducción de los costes de mantenimiento.	0.0538	0.0067
	CET.C34 Mejora de la diagnosis del equipamiento.	0.0491	0.0061
CUS. Criterios de Utilidad Social. $w_{CUS}=0.0637$	CUS.C35.- Mejora de las comunicaciones entre los municipios.	0.1428	0.0091
	CUS.C10.- Mejora de la seguridad vial del entorno	0.7143	0.0455
	CUS.C27.- Mejora de la permeabilidad urbana.	0.1428	0.0091
CSA. Criterios de Sostenibilidad medioambiental. $w_{CSA} = 0.0216$	CSA.C29.- Reducción de la contaminación acústica.	0.2175	0.0047
	CSA.C30.- Mejora de la eficiencia energética.	0.188	0.004
	CSA.C31.- Reducción Impacto ambiental durante la actuación.	0.0597	0.0013
	CSA.C32.- Reducción impacto ambiental FFCC.	0.5347	0.0116
CEE. Criterios de Eficiencia económica $w_{CEE}=0.0655$	CEE.C22.- Coste de la actuación de mejora	0.2951	0.0193
	CEE.C17.- Coste de Mejoras subsiguientes.	0.1781	0.0117
	CEE.C23.- Coste de explotación futura.	0.2951	0.0193
	CEE.C28.- Tiempo de amortización de la actuación.	0.1781	0.0117
CTV. Criterio de Tramo de vía.	CTV.C33 Criterio tramo de vía	1.0000	0.10809

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

$w_{CTV} = 0.10809$

Tabla 5 1 Pesos locales y globales de los criterios en AHP.

La Tabla 5 2 muestra los criterios ordenados según su peso global y el acumulado.

<i>Criterio</i>	<i>Peso Global</i>	<i>Peso Acumulado</i>
CSC.C1.- Reducción del número de pasos a nivel.	0,16469	0,16469
CSC.C3.- Mejora de los sistemas de ayuda a la conducción.	0,11976	0,28445
CSC.C4.- Automatización de Itinerarios y bloqueos.	0,11976	0,40421
CTV.C33 Criterio tramo de vía	0,10809	0,5123
CSE.C5.- Reducción de los tiempos de viaje.	0,09387	0,60617
CET.C8.- Reducción en el número de incidencias.	0,07924	0,68541
CSE.C6.- Reducción del cantón crítico.	0,05162	0,73703
CUS.C10.- Mejora de la seguridad vial del entorno	0,04551	0,78254
CET.C9.- Reducción de los retrasos.	0,03191	0,81445
CSC.C2.- Mejora de la señalización de pasos a nivel.	0,03111	0,84556
CEE.C22.- Coste de la actuación de mejora	0,03026	0,87582
CSE.C15.- Aumento del número de circulaciones.	0,02958	0,9054
CEE.C23.- Coste de explotación futura.	0,01932	0,92472
CEE.C28.- Tiempo de amortización de la actuación.	0,01166	0,93638
CSA.C32.- Reducción impacto ambiental FFCC.	0,01156	0,94794

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

CUS.C35.- Mejora de las comunicaciones entre los municipios.	0,0091	0,95704
CUS.C27.- Mejora de la permeabilidad urbana.	0,0091	0,96614
CSE.C7.- Mejora de los sistemas de explotación.	0,00679	0,97293
CET.C16.- Reducción de los costes de mantenimiento.	0,00667	0,9796
CET.C34 Mejora de la diagnosis del equipamiento.	0,00608	0,98568
CSA.C29.- Reducción de la contaminación acústica.	0,0047	0,99038
CEE.C17.- Coste de Mejoras subsiguientes.	0,00423	0,99461
CSA.C30.- Mejora de la eficiencia energética.	0,00407	0,99868
CSA.C31.- Reducción Impacto ambiental durante la actuación.	0,00129	0,99997

Tabla 5 2 Pesos acumulados por criterio.

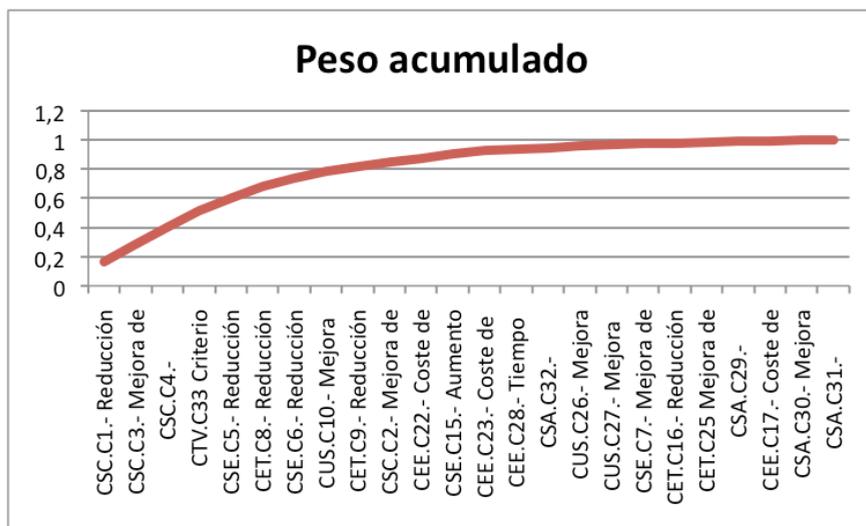


Figura 5 1 Pesos acumulados de los criterios en AHP. Elaboración propia.

La Tabla 5 2 y la Figura 5 1 muestran que sólo un grupo muy reducido de criterios acumulan la mayor importancia, mientras que la mayor parte de los elementos tienen una importancia marginal. Los criterios más importantes son aquellos relativos a la seguridad y al tipo de línea. Estos resultados son consistentes con la intuición del decisor y la política de la empresa. El criterio de mayor peso es el criterio de Reducción en el número de pasos a nivel (CSC.C1). Este resultado concuerda con la afirmación "los pasos a nivel son considerados universalmente el punto más débil en términos de seguridad ferroviaria" (Silmon & Roberts, 2010). El tipo de línea (CTV.C33) es el criterio más importante no asociado a la seguridad, siendo mayor la prioridad de aquellas líneas con un uso más cercano a su capacidad límite, medida en kmtren, como las líneas de vía única y las líneas con muchos pasos a nivel.

Es relevante resaltar la poca importancia que le ha dado el decisor a los criterios de utilidad social y costes medioambientales y la alta importancia dada a la reducción de los tiempos de viaje. Es necesario tener en cuenta que las actuaciones de MR&I se realizan sobre líneas en servicio, mientras que los impactos medioambientales y sociales se presentan en la construcción de nuevas líneas, que se escapan del alcance de este trabajo.

Análogamente resulta sorprendente la poca influencia del criterio CSE.C7 Mejora de los sistemas de explotación, puesto que este criterio se ha considerado tradicionalmente muy importante. En su lugar el decisor consideró realmente importante los tiempos de viaje y los cantones críticos, ambos afectados por las actuaciones de mejora de los sistemas de explotación pero dependiendo de las condiciones del tramo y del uso que se le esté dando.

5.2. Ponderación de criterios. Modelo ANP-BC.

La evolución del modelo AHP consiste en convertir la jerarquía en un modelo en red, con dos subredes: una subred de beneficios y una subred de costes. Los criterios son los mismos que en el modelo jerárquico, pero reagrupados para poder estudiar las influencias de los criterios entre sí, incorporando la información más precisa que aportan las relaciones. Este modelo surgió tras el análisis de la ponderación de criterios con AHP, dónde se observó que, según el decisor, la ponderación de algunos criterios se podría ver afectada por la influencia de otros

En esta fase se siguió el método ANP para cada una de las subredes. El primer paso en este nuevo análisis fue identificar la influencia de unos criterios sobre otros. Para ello se establecieron las correspondientes matrices de influencias. El decisor también fue emitiendo juicios mediante comparación pareada para construir las matrices de pesos locales y globales. Solo fue necesario añadir los nuevos juicios vinculados a las comparaciones de influencia entre criterios. A continuación se evaluaron cada una de las alternativas respecto a cada criterio asociando la categoría correspondiente. Para la realización de esta parte de los trabajos también se utilizó el software Super Decisions.

Las categorías también son las mismas que en el caso del AHP, permitiendo reutilizar la valoración de las actuaciones y que las diferencias en las prioridades sean debidas únicamente al cambio de prioridades entre los criterios.

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

Las matrices de influencia entre criterios se pueden ver en las tablas Tabla 5 3 y Tabla 5 4.

	CSC.C1	CSC.C2	CSC.C3	CSC.C4	CSE.C5	CSE.C6	CSE.C15	CSE.C7	CET.C8	CET.C9	CET.C16	CET.C25	CUS.C26	CUS.C10	CUS.C27	CSA.C29	CSA.C30	CSA.C31	CSA.C32
CSC.C1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0
CSC.C2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0
CSC.C3	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0
CSC.C4	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0
CSE.C5	0	0	1	0	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0
CSE.C6	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1
CSE.C15	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0
CSE.C7	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
CET.C8	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0
CET.C9	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CET.C16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CET.C25	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.125	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CUS.C26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CUS.C10	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CUS.C27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

CSA.C29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.460	0.250
CSA.C30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.221	0.750
CSA.C31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.319	0
CSA.C32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 5 3 Matriz de influencia en las subred de beneficios del modelo ANP-BC

	CET.C16	CEE.C22	CEE.C17	CEE.C23	CEE.C28	CTV.C33
CET.C16	1	0	0	1	0	1
CEE.C22	0	1	0	0	0	0
CEE.C17	0	0	1	0	0	0
CEE.C23	1	0	0	1	0	0
CEE.C28	0	0	0	0	1	0
CTV.C33	1	1	1	1	1	1

Tabla 5 4 Matriz de influencia en la subred de Costes del modelo ANP-BC

Las tablas de comparaciones locales (unweighted) se pueden ver a en la Tabla 5 5 y en la Tabla 5 6.

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

	CSC.C1	CSC.C2	CSC.C3	CSC.C4	CSE.C5	CSE.C6	CSE.C15	CSE.C7	CET.C8	CET.C9	CET.C16	CET.C25	CUS.C26	CUS.C10	CUS.C27	CSA.C29	CSA.C30	CSA.C31	CSA.C32
CSC.C1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.685	0.689	0.603	0	0.833	0.772	0.833	0	0	0	0
CSC.C2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.057	0.071	0	0.166	0.173	0.167	0	0	0	0
CSC.C3	0	0	0	1	0.500	0.167	0	0.500	0.080	0.126	0.176	0.750	0	0.054	0	1	0.500	0	0
CSC.C4	0	0	0	0	0.500	0.833	0	0.500	0.234	0.126	0.149	0.250	0	0	0	0	0.500	0	0
CSE.C5	0	0	0.166	0	0	0.637	0.105	0.250	0	0.356	0	0	0.167	0	0	0.875	0.833	0	0
CSE.C6	0	0	0.833	0	0.731	0	0.637	0.750	0	0.474	0	0	0	0	0	0	0.167	0	0
CSE.C15	0	0	0	0	0.081	0.105	0	0	0.500	0.044	1	0	0.833	0	0	0.125	0	0	0

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

CSE. C7	0	0	0	1	0.188	0.258	0.258	0	0.500	0.125	0	1	0	0	0	0	0	0	0
CET. C8	0	0	0	0	0.125	0	0	0	0	0.875	1	0	0	0	0	0	1	0	0
CET. C-	0	0	0	0	0.875	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CET. C16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CET. C25	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.125	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CUS. C26.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CUS. C10.	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CUS. C27.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
CSA. C29.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.460	0.250

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

CSA. C30.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.221	0.750
CSA. C31.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.319	0
CSA. C32.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 5 5 Matriz de comparación local de la subred de Beneficios del modelo ANP-BC

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

	CET.C16	CEE.C22	CEE.C17	CEE.C23	CEE.C28	CTV.C33
CET.C16	1	0	0	1	0	1
CEE.C22	0	1	0	0	0	0
CEE.C17	0	0	1	0	0	0
CEE.C23	1	0	0	1	0	0
CEE.C28	0	0	0	0	1	0
CTV.C33	1	1	1	1	1	1

Tabla 5 6 Matriz de comparación local de la subred de costes del modelo ANP-BC

Una vez ponderado el peso de cada criterio de forma global, el resultado se puede ver en las tablas Tabla 5 7 y Tabla 5 8.

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

	CSC.C1	CSC.C2	CSC.C3	CSC.C4	CSE.C5	CSE.C6	CSE.C15	CSE.C7	CET.C8	CET.C9	CET.C16	CET.C25	CUS.C26	CUS.C10	CUS.C27	CSA.C29	CSA.C30	CSA.C31	CSA.C32
CSC.C1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.446	0.448	0.392	0	0.571	0.772	0.833	0	0	0	0
CSC.C2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.038	0.046	0	0.114	0.173	0.167	0	0	0	0
CSC.C3	0	0	0	0.766	0.115	0.042	0	0.125	0.052	0.082	0.115	0.559	0	0.054	0	0.583	0.137	0	0
CSC.C4	0	0	0	0	0.115	0.208	0	0.125	0.152	0.082	0.097	0.186	0	0	0	0	0.137	0	0
CSE.C5	0	0	0.167	0	0	0.478	0.105	0.187	0	0.079	0	0	0.039	0	0	0.364	0.163	0	0

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

CSE. C6	0	0	0.833	0	0.506	0	0.637	0.562	0	0.105	0	0	0	0	0	0	0.033	0	0
CSE. C15	0	0	0	0	0.056	0.078	0	0	0.111	0.010	0.222	0	0.195	0	0	0.052	0	0	0
CSE. C7	0	0	0	0.234	0.130	0.194	0.258	0	0.111	0.028	0	0.255	0	0	0	0	0	0	0
CET. C8	0	0	0	0	0.010	0	0	0	0	0.111	0.127	0	0	0	0	0	0.530	0	0
CET. C9	0	0	0	0	0.067	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CET. C16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CET. C25	0	0	0	0	0	0	0	0	0.127	0.016	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

CUS. C26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CUS. C10	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CUS. C27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.080	0	0	0	0	0	0	0
CSA. C29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.460	0.250
CSA. C30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.221	0.750
CSA. C31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.319	0
CSA. C32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 5 7 Matriz de comparación global de la subred de Beneficios del modelo ANP-BC

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

	CET.C16	CEE.C22	CEE.C17	CEE.C23	CEE.C28	CTV.C33
CET.C16	0.460	0	0	0.714	0	0.125
CEE.C22	0	0.500	0	0	0	0
CEE.C17	0	0	0.500	0	0	0
CEE.C23	0.221	0	0	0.143	0	0
CEE.C28	0	0	0	0	0.500	0
CTV.C33	0.319	0.500	0.500	0.143	0.500	0.875

Tabla 5 8 Matriz de comparación global de la subred de costes del modelo ANP-BC

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

5.2.1. Pesos obtenidos en el modelo ANP-BC.

Los pesos en la nueva situación son los siguientes.

Subred de Beneficios ANP-BC

Criterio	Peso Local	Peso Global
CSC.C1.	0.09911	0,049555
CSC.C2.	0.02130	0,01065
CSC.C3.	0.11498	0,05749
CSC.C4.	0.08538	0,04269
CSE.C5.	0.16279	0,081395
CSE.C6.	0.25361	0,126805
CSE.C15.	0.02946	0,01473
CSE.C7.	0.09871	0,049355
CET.C8.-	0.00278	0,00139
CET.C9.-	0.01096	0,00548
CET.C16.-	0	0
CET.C25	0.00053	0,000265
CUS.C26.	0	0
CUS.C10.	0.12040	0,0602
CUS.C27.	0	0
CSA.C29.	0	0
CSA.C30.	0	0
CSA.C31.	0	0
CSA.C32.	0	0

Tabla 5 9 Pesos de los criterios en la subred de Beneficios del modelo ANP-BC

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

Subred de Costes ANP-BC

Criterio	Peso	Peso Global
CET.C16	0.24370	0,12185
CEE.C22.	0	0
CEE.C17.	0	0
CEE.C23	0.06287	0,031435
CEE.C28.	0	0
CTV.C33.	0.69343	0,346715

Tabla 5 10 Pesos de los criterios en la subred de Costes del modelo ANP-BC

5.2.2. Comparación de resultados entre AHP y ANP-BC.

Los pesos de los criterios de forma conjunta en ambos modelos es la siguiente.

<i>Criterio</i>	<i>AHP Peso Global</i>	<i>ANP-BC Peso Global</i>
CSC.C1.- Reducción del número de pasos a nivel.	0,16469	0,049555
CSC.C3.- Mejora de los sistemas de ayuda a la conducción.	0,11976	0,05749
CSC.C4.- Automatización de Itinerarios y bloqueos.	0,11976	0,04269
CTV.C33 Criterio tramo de vía	0,10809	0,346715
CSE.C5.- Reducción de los tiempos de viaje.	0,09387	0,081395

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

CET.C8.- Reducción en el número de incidencias.	0,07924	0,00139
CSE.C6.- Reducción del cantón crítico.	0,05162	0,126805
CUS.C10.- Mejora de la seguridad vial del entorno	0,04551	0,0602
CET.C9.- Reducción de los retrasos.	0,03191	0,00548
CSC.C2.- Mejora de la señalización de pasos a nivel.	0,03111	0,01065
CEE.C22.- Coste de la actuación de mejora	0,03026	0
CSE.C15.- Aumento del número de circulaciones.	0,02958	0,01473
CEE.C23.- Coste de explotación futura.	0,01932	0,031435
CEE.C28.- Tiempo de amortización de la actuación.	0,01166	0
CSA.C32.- Reducción impacto ambiental FFCC.	0,01156	0
CUS.C26.- Mejora de las comunicaciones entre los municipios.	0,0091	0
CUS.C27.- Mejora de la permeabilidad urbana.	0,0091	0
CSE.C7.- Mejora de los sistemas de explotación.	0,00679	0,049355
CET.C16.- Reducción de los costes de mantenimiento.	0,00667	0,12185
CET.C25 Mejora de la diagnosis del equipamiento.	0,00608	0,000265
CSA.C29.- Reducción de la contaminación acústica.	0,0047	0
CEE.C17.- Coste de Mejoras subsiguientes.	0,00423	0
CSA.C30.- Mejora de la eficiencia energética.	0,00407	0

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

CSA.C31.- Reducción Impacto ambiental durante la actuación.	0,00129	0
---	---------	---

Tabla 5 11 Pesos de los criterios en AHP y ANP-BC.

Comparando los pesos de los criterios dentro de cada subred ANP-BC y los pesos en la jerarquía AHP, se puede ver que una gran parte de los criterios no se ven muy alterados pero que, en general, los pesos están más concentrados. Parte de los criterios que ya eran importantes en la jerarquía se vuelven más importantes en la red. Principalmente el criterio CSE.C5 (Reducción de los tiempos de viaje) y el criterio CSE.C6 (Reducción del cantón crítico). Con respecto a la subred de coste casi todo el peso se concentra en el CTV.C33 criterio de tipo de línea CET.C16 (Reducción de los costes de mantenimiento).

Es especialmente destacable que los criterios que tenían pesos muy pequeños en AHP quedan reducidos a cero en la red y que el criterio CEE.C22 (coste de la actuación de mejora) queda con un peso despreciable. Si se tiene en cuenta que no se busca como objetivo una rentabilidad económica y si una mejora del funcionamiento de la red, el coste no es demasiado relevante, sobre todo cuando no hay grandes diferencias entre proyectos.

Este efecto es el habitual en las conversiones de jerarquías a redes al concentrarse las prioridades en unos pocos criterios que son los que influyen principalmente sobre los demás.

En los resultados obtenidos vemos que existen variaciones importantes en los pesos de los criterios, aunque hemos de destacar que lo que obtenemos en ambos casos son cosas diferentes, ya que en AHP se obtiene la importancia que le da el decisor a los criterios de forma independiente, mientras que en ANP la prioridad obtenida tiene en cuenta la influencia entre criterios.

La importancia que los criterios tienen en AHP es la que el DM le ha asignado en base a su experiencia y conocimiento. Sin embargo, cuando se estudia la influencia entre criterios, esas importancias se matizan. Criterios que el DM considera muy importantes, se da cuenta de que realmente no lo son tanto. En general se observa que ganan influencia los

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

critérios que aglutinan mejoras en la funcionalidad de las instalaciones, cediéndolas los criterios que dan esas mejoras indirectamente, por ejemplo la automatización de itinerarios y bloqueos pierde influencia ya que su efecto se ve transmitido a otros criterios como la reducción de incidencias, reducción del cantón crítico, aumento de capacidad, etc.

5.3. Ponderación de criterios con el modelo ANP-BOCR.

Una vez analizado el modelo en red ANP-BC, el decisor pensó que era conveniente considerar también criterios de oportunidad y de riesgo. Se evolucionó al modelo final de BOCR, explicado en el Capítulo 3. El procedimiento para obtener los juicios del decisor fue similar al modelo anterior, pero con cuatro subredes. Además, tal y como se especificó en el Capítulo 4 algunos criterios se modificaron. Por esta razón este modelo no es directamente comparable, respecto a la ponderación de criterios, con los dos anteriores.

5.3.1. Análisis del peso de los criterios del modelo ANP-BOCR.

Dentro del modelo ANP-BOCR existen cuatro subredes con sus matrices representativas.

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

Las Matrices de influencia de cada subred son:

Para la subred de Beneficios. Tabla 5 12

	CSC.C1	CSC.C2	CSC.C3	CSC.C4	CSE.C5	CSE.C6	CSE.C7	CET.C8	CET.C9	CUS.C1 0	CTV.C1 1	CTV.C1 2	CTV.C1 3	CTV.C1 4
CSC.C1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
CSC.C2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0
CSC.C3	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
CSC.C4	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1
CSE.C5	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0
CSE.C6	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0
CSE.C7	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1
CET.C8	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0
CET.C9	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0
CUS.C10	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
CTV.C1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

11														
CTV.C12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0
CTV.C13	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0
CTV.C14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1

Tabla 5 12 Matriz de influencia de la subred de beneficios del modelo ANP-BOCR

Para la subred de Oportunidades. Tabla 5 13.

	CTV.C11	CTV.C12	CTV.C13	CTV.C14	CML.C18	CML.C20	CML.C20	CTV.C21	CMU.C8	CMU.C15	CMC.C16	CMC.C17
CTV.C11	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
CTV.C12	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1
CTV.C13	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1
CTV.C14	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1
CML.C18	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

CML.C1 9	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
CML.C2 0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1
CTV.C2 1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1
CMU.C8	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0
CMU.C1 5	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0
CMC.C1 6	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0
CMC.C1 7	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0

Tabla 5 13 Matriz de influencia de la subred de Oportunidades del modelo ANP-BOCR

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

Para la subred de Costes. Tabla 5 14

	CTV.C11	CTV.C12	CTV.C13	CTV.C14	CEE.C23.	CEE.C24.	CEE.C22
CTV.C11	1	0	0	0	1	1	1
CTV.C12	0	1	0	0	1	1	1
CTV.C13	0	0	1	1	1	1	1
CTV.C14	0	0	1	1	1	1	1
CEE.C23	1	1	0	0	1	1	1
CEE.C24	0	1	1	1	1	0	1
CEE.C22	0	0	0	0	1	1	0

Tabla 5 14 Matriz de influencia de la subred de Costes del modelo ANP-BOCR

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

Para la subred de Riesgos. Tabla 5 15

	CTV.C11	CTV.C12	CTV.C13	CTV.C14	CUF.C24	CVP.C25	CVP.C26
CTV.C11	1	0	0	0	1	1	1
CTV.C12	0	1	0	0	1	1	1
CTV.C13	0	0	1	0	1	1	1
CTV.C14	0	0	1	1	1	1	1
CUF.C24	1	1	0	1	0	0	1
CVP.C25	0	1	0	1	0	0	1
CVP.C26	1	0	0	1	1	1	0

Tabla 5 15 Matriz de influencia de la subred de Riesgos del modelo ANP-BOCR

Las matrices de pesos locales para cada subred se pueden ver a continuación

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

Matriz Subred de Beneficios. Tabla 5 16

	CSC.C1	CSC.C2	CSC.C3	CSC.C4	CSE.C5	CSE.C6.	CSE.C7	CET.C8.	CET.C9	CUS.C10	CTV.C11.	CTV.C12	CTV.C13	CTV.C14
CSC.C 1	0	0	0	0	0	0	0	0,68542	0,68935	0,77202	0	0	0	0
CSC.C 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0,05792	0,17344	0	0,24998	0	0
CSC.C 3	0	0	0	1	0,5	0,16667	0,12503	0,08017	0,12636	0,05455	0,5	0,75002	0,5	0,24998
CSC.C 4	0	0	0	0	0,5	0,83333	0,87497	0,23441	0,12636	0	0,5	0	0,5	0,75002
CSE.C 5	0	0	0	0	0	1	0,24998	0	0,38795	0	0,24998	0	0	0
CSE.C 6	0	0	0	0	0,83333	0	0,75002	0	0,51455	0	0,75002	0	0	0

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

CSE.C 7	0	0	1	1	0,16667	0	0	1	0,0975	0	0	0	1	1
CET.C 8	0	0	0	0	0,12503	0,75	0	0	1	0	0	0	0	0
CET.C 9	0	0	0	0	0,87497	0,25	0	0	0	0	1	0	0	0
CUS.C 10	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
CTV.C 11	0,06467	0,06507	0,19424	0,2622	0,0625	0,40995	0,20874	0,3217	0,11575	0,05855	1	0	0	0
CTV.C 12	0,57102	0,59171	0,5356	0,56501	0,0625	0,05962	0,6428	0,55773	0,52288	0,56354	0	1	0	0
CTV.C 13	0,24061	0,16188	0,1775	0,05528	0,4375	0,23232	0,09724	0,05439	0,09881	0,05855	0	0	0,5	0
CTV.C 14	0,1237	0,18133	0,09266	0,11751	0,4375	0,29811	0,05122	0,06619	0,26256	0,31936	0	0	0,5	1

Tabla 5 16 Matriz de pesos locales de la subred de beneficios del ANP-BOCR

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

Matriz de pesos locales de la subred de Oportunidades. Tabla 5 17

	CTV.C11	CTV.C12	CTV.C13	CTV.C14	CML.C18	CML.C20	CML.C20	CTV.C21	CMU.C8	CMU.C15	CMC.C16	CMC.C17
CTV.C11	1	0	0	0	0	0	0	0	0,25	0,52224	0,15618	0,23367
CTV.C12	0	1	0	0	0,63698	0,71429	0	0	0,25	0,07809	0,65865	0,07176
CTV.C13	0	0	0,75	0	0,10472	0,14286	0	0	0,25	0,19983	0	0,1161
CTV.C14	0	0	0,25	1	0,25829	0,14286	0	0	0,25	0,19983	0,18517	0,57847
CML.C18	0,07775	0,125	0	0	0	1	0	0	0	0,5	0	0
CML.C20	0,4174	0,375	0	0	0	0	0	0	0	0,5	0	0

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

CML.C2 0	0,40801	0,375	0	0,83333	0	0	1	1	0,5	0	0,5	0,5
CTV.C2 1	0,09685	0,125	0	0,16667	0	0	0	0	0,5	0	0,5	0,5
CMU.C8	0	1	0	0	0,87497	0,87497	0,83333	0,5	0,75002	0,25	1	0
CMU.C1 5	0	0	0	0	0,12503	0,12503	0,16667	0,5	0,24998	0,75	0	0
CMC.C1 6	0	0	0	0	0,5	0,75	0,75	0,83333	0	0	0	0
CMC.C1 7	0	0	0	0	0,5	0,25	0,25	0,16667	0	0	0	0

Tabla 5 17 Matriz de pesos locales de la subred de Oportunidades del ANP-BOCR

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

Matriz de pesos locales de la subred de Costes. Tabla 5 18

	CTV.C11	CTV.C12	CTV.C13	CTV.C14	CEE.C23	CEE.C24	CEE.C22
CTV.C11	1	0	0	0	0,5255	0,61316	0,0506
CTV.C12	0	1	0	0	0,15786	0,08918	0,10438
CTV.C13	0	0	0,75	0,24998	0,20978	0,20849	0,42251
CTV.C14	0	0	0,25	0,75002	0,10685	0,08918	0,42251
CEE.C23	1	0,24998	0	0	0,73064	0,875	0,5
CEE.C24	0	0,75002	1	1	0,18839	0	0,5
CEE.C22	0	0	0	0	0,08096	0,125	0

Tabla 5 18 Matriz de pesos locales de la subred de Costes del ANP-BOCR

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

Matriz de pesos locales de la subred de Riesgos. Tabla 5 19

	CTV.C11	CTV.C12	CTV.C13	CTV.C14	CUF.C24	CVP.C25	CVP.C26
CTV.C11	1	0	0	0	0,21677	0,125	0,125
CTV.C12	0	1	0	0	0,05962	0,125	0,125
CTV.C13	0	0	0,75	0	0,50683	0,375	0,375
CTV.C14	0	0	0,25	1	0,21677	0,375	0,375
CUF.C24	1	1	0	1	0	0	1
CVP.C25	0	1	0	0,83333	0	0	1
CVP.C26	1	0	0	0,16667	1	1	0

Tabla 5 19 Matriz de pesos locales de la subred de Riesgos del ANP-BOCR

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

Aplicando los pesos de cada grupo de criterios obtenemos las matrices de pesos globales de cada subred.

Matriz de pesos globales de la subred de beneficios. Tabla 5 20

	CSC.C1	CSC.C2	CSC.C3	CSC.C4	CSE.C5	CSE.C6	CSE.C7	CET.C8	CET.C9	CUS.C10	CTV.C11	CTV.C12	CTV.C13	CTV.C14
CSC.C1	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.14175	0.13173	0.57901	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
CSC.C2	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.01107	0.13008	0.00000	0.07029	0.00000	0.00000
CSC.C3	0.00000	0.00000	0.00000	0.23860	0.06816	0.02272	0.01797	0.01658	0.02415	0.04091	0.11168	0.21088	0.13271	0.06635
CSC.C4	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.06816	0.11360	0.12572	0.04848	0.02415	0.00000	0.11168	0.00000	0.13271	0.19907
CSE.C5	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.54090	0.14253	0.00000	0.02948	0.00000	0.02006	0.00000	0.00000	0.00000
CSE.C6	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.45075	0.00000	0.42763	0.00000	0.03910	0.00000	0.06020	0.00000	0.00000	0.00000
CSE.C7	0.00000	0.00000	0.28169	0.21448	0.09015	0.00000	0.00000	0.08224	0.00741	0.00000	0.00000	0.00000	0.09538	0.09538
CET.C8	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00641	0.03848	0.00000	0.00000	0.07598	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

CET.C 9	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.04489	0.01283	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.15847	0.00000	0.00000	0.00000
CUS.C 10	0.08331	0.08331	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.04169	0.00000	0.00000
CTV.C 11	0.05928	0.05965	0.13953	0.14340	0.01697	0.11129	0.05973	0.22872	0.07604	0.01464	0.53791	0.00000	0.00000	0.00000
CTV.C 12	0.52345	0.54242	0.38473	0.30902	0.01697	0.01619	0.18394	0.39652	0.34350	0.14088	0.00000	0.67714	0.00000	0.00000
CTV.C 13	0.22056	0.14840	0.12750	0.03024	0.11877	0.06307	0.02782	0.03867	0.06491	0.01464	0.00000	0.00000	0.31960	0.00000
CTV.C 14	0.11340	0.16622	0.06656	0.06427	0.11877	0.08093	0.01466	0.04705	0.17249	0.07984	0.00000	0.00000	0.31960	0.63921

Tabla 5 20 Matriz de pesos globales de la subred de beneficios del ANP-BOCR

Matriz de pesos globales de la subred de Oportunidades. **Tabla 5 21**

	CTV.C11	CTV.C12	CTV.C13	CTV.C14	CML.C1 8	CML.C2 0	CML.C2 0	CTV.C21	CMU.C8	CMU.C1 5	CMC.C1 6	CMC.C1 7
CTV.C11	0.12150	0.12150	0.12150	0.12150	0.12150	0.12150	0.12150	0.12150	0.12150	0.12150	0.12150	0.12150

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

CTV.C12	0.08040	0.08040	0.08040	0.08040	0.08040	0.08040	0.08040	0.08040	0.08040	0.08040	0.08040	0.08040
CTV.C13	0.07836	0.07836	0.07836	0.07836	0.07836	0.07836	0.07836	0.07836	0.07836	0.07836	0.07836	0.07836
CTV.C14	0.19389	0.19389	0.19389	0.19389	0.19389	0.19389	0.19389	0.19389	0.19389	0.19389	0.19389	0.19389
CML.C18	0.00943	0.00943	0.00943	0.00943	0.00943	0.00943	0.00943	0.00943	0.00943	0.00943	0.00943	0.00943
CML.C19	0.02042	0.02042	0.02042	0.02042	0.02042	0.02042	0.02042	0.02042	0.02042	0.02042	0.02042	0.02042
CML.C20	0.12110	0.12110	0.12110	0.12110	0.12110	0.12110	0.12110	0.12110	0.12110	0.12110	0.12110	0.12110
CTV.C21	0.05828	0.05828	0.05828	0.05828	0.05828	0.05828	0.05828	0.05828	0.05828	0.05828	0.05828	0.05828
CMU.C8	0.14211	0.14211	0.14211	0.14211	0.14211	0.14211	0.14211	0.14211	0.14211	0.14211	0.14211	0.14211
CMU.C15	0.04156	0.04156	0.04156	0.04156	0.04156	0.04156	0.04156	0.04156	0.04156	0.04156	0.04156	0.04156
CMC.C16	0.10119	0.10119	0.10119	0.10119	0.10119	0.10119	0.10119	0.10119	0.10119	0.10119	0.10119	0.10119
CMC.C17.	0.03176	0.03176	0.03176	0.03176	0.03176	0.03176	0.03176	0.03176	0.03176	0.03176	0.03176	0.03176

Tabla 5 21 Matriz de pesos globales de la subred de Oportunidades del ANP-BOCR

Matriz de pesos globales de la subred de costes. Tabla 5 22

	CTV.C11	CTV.C12	CTV.C13	CTV.C14	CEE.C23	CEE.C24	CEE.C22
CTV.C11	0.83333	0.00000	0.00000	0.00000	0.13137	0.15328	0.01265
CTV.C12	0.00000	0.83333	0.00000	0.00000	0.03946	0.02229	0.02609
CTV.C13	0.00000	0.00000	0.62500	0.20832	0.05244	0.05212	0.10562
CTV.C14	0.00000	0.00000	0.20833	0.62502	0.02671	0.02229	0.10562
CEE.C23	0.16667	0.04166	0.00000	0.00000	0.54800	0.65627	0.37501
CEE.C24	0.00000	0.12500	0.16667	0.16667	0.14130	0.00000	0.37501
CEE.C22	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.06072	0.09375	0.00000

Tabla 5 22 Matriz de pesos globales de la subred de Costes del ANP-BOCR

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

Matriz de pesos globales de la subred de Riesgos. Tabla 5 23

	CTV.C11	CTV.C12	CTV.C13	CTV.C14	CUF.C24	CVP.C25	CVP.C26
CTV.C11	0.58416	0.00000	0.00000	0.00000	0.16258	0.06511	0.06125
CTV.C12	0.00000	0.58416	0.00000	0.00000	0.04472	0.06511	0.06125
CTV.C13	0.00000	0.00000	0.75000	0.00000	0.38012	0.19533	0.18377
CTV.C14	0.00000	0.00000	0.25000	0.58416	0.16258	0.19533	0.18377
CUF.C24	0.28083	0.28083	0.00000	0.28083	0.00000	0.00000	0.05922
CVP.C25	0.00000	0.13501	0.00000	0.11251	0.00000	0.00000	0.45074
CVP.C26	0.13501	0.00000	0.00000	0.02250	0.25000	0.47911	0.00000

Tabla 5 23 Matriz de pesos globales de la subred de Riesgos del ANP-BOCR

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

Los pesos de los diferentes criterios se incluyen a continuación.

Para la subred de beneficios, Tabla 5 24

BENEFICIOS		
Nombre del criterio	Normalizado por cluster	General
C1.- Reducción en el número de PaN	0.05812	0.012312
C2.- Mejora en la señalización de los PaN	0.11969	0.025354
C3.- Mejora en los sistemas de ayuda a la conducción	0.53989	0.114365
C4.- Automatización de itinerarios y bloqueos	0.28230	0.059799
C5.- Reducción del tiempo de viaje	0.25160	0.039798
C6.- Reducción del cantón crítico	0.32914	0.052063

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

C7.- Mejora de los sistemas de explotación	0.41925	0.066316
C8.- Reducción de incidencias	0.17847	0.003473
C9.- Reducción de retrasos	0.82153	0.015987
C10.- Mejora de la seguridad vial del entorno	1.00000	0.016777
C11.- kmtren/km	0.14382	0.085397
C12.- Pasos a nivel en la línea	0.55098	0.327150
C13.- Velocidad de la línea	0.08451	0.050178
C14.- Nivel de señalización	0.22068	0.131032

Tabla 5 24 Pesos de los criterios de la subred de Beneficios del ANP-BOCR

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

La subred de Oportunidades. Tabla 5 25

OPORTUNIDADES		
Nombre del criterio	Normalizado por cluster	General
C11.- kmtren/km	0.25625	0.121502
C12.- Pasos a nivel en la línea	0.16956	0.080399
C13.- Velocidad de la línea	0.16526	0.078358
C14.- Nivel de señalización	0.40892	0.193890
C18.- Retrasos/km	0.04507	0.009430
C19.- Retrasos/kmtren	0.09758	0.020416
C20.- Incidencias/km	0.57879	0.121100

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

C21.- Incidencias/kmtren	0.27856	0.058283
C8.- Reducción en el número de incidencias	0.77372	0.142106
C15.- Aumento del número de trenes	0.22628	0.041560
C16.- Reducción de los costes de mantenimiento	0.76112	0.101195
C17.- Coste de mejoras subsiguientes.	0.23888	0.031761

Tabla 5 25 Pesos de los criterios de la subred de Oportunidades del ANP-BOCR

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

Para la subred de Costes. Tabla 5 26

COSTES		
Nombre del criterio	Normalizado por Cluster	General
C11.- kmtren/km	0.51548	0.309281
C12.- Pasos a nivel en la línea	0.13822	0.082932
C13.- Velocidad de la línea	0.18745	0.112466
C14.- Nivel de señalización	0.15884	0.095303
C23.- Costes de operación futuros	0.69983	0.279945
C24.- Costes de mantenimiento futuros	0.23559	0.094239
C22.- Coste de la actuación de mejora	0.06458	0.025834

Tabla 5 26 Pesos de los criterios de la subred de Costes del ANP-BOCR

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

Para la subred de Riesgos. Tabla 5 27

RIESGOS		
Nombre del criterio	Normalizado por Cluster	General
C11.- kmtren/km	0.09972	0.071648
C12.- Pasos a nivel en la línea	0.05201	0.037368
C13.- Velocidad de la línea	0.42515	0.305471
C14.- Nivel de señalización	0.42313	0.304019
C24.- Costes de mantenimiento futuro	1.00000	0.120946
C25.- Desviación en costes	0.47921	0.076937
C26.- Desviación en resultados	0.52079	0.083612

Tabla 5 27 Pesos de los criterios de la subred de Riesgos del ANP-BOCR

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

Se ha representado la misma información de forma gráfica, se puede ver en Figura 5 2, Figura 5 3, Figura 5 4, Figura 5 5, mostrando, para cada una de las subredes como va aportando peso cada criterio hasta llegar al 100% de la ponderación.

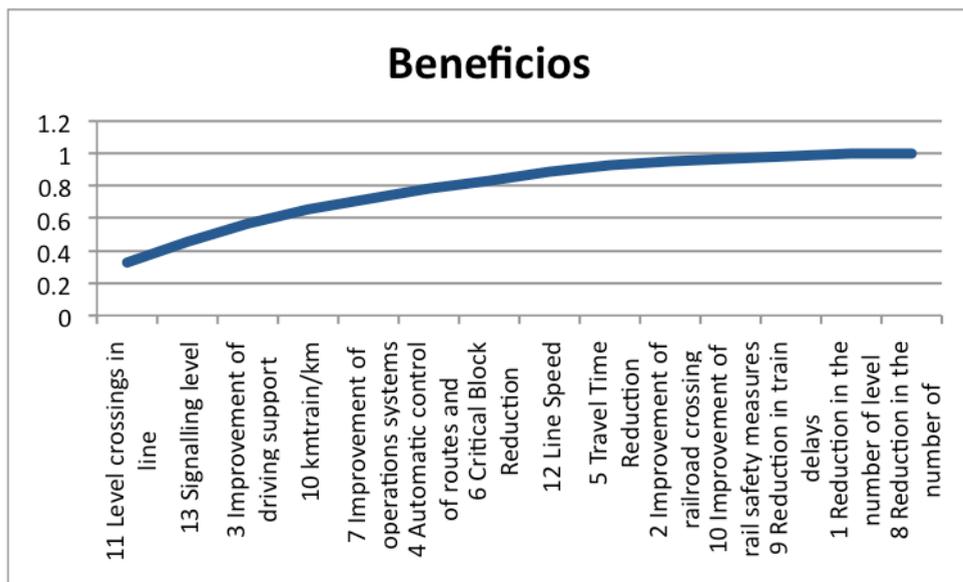


Figura 5 2 Aportación acumulada de cada criterio al total de la subred de beneficios.

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.



Figura 5 3 Aportación acumulada de cada criterio al total de la subred de oportunidades

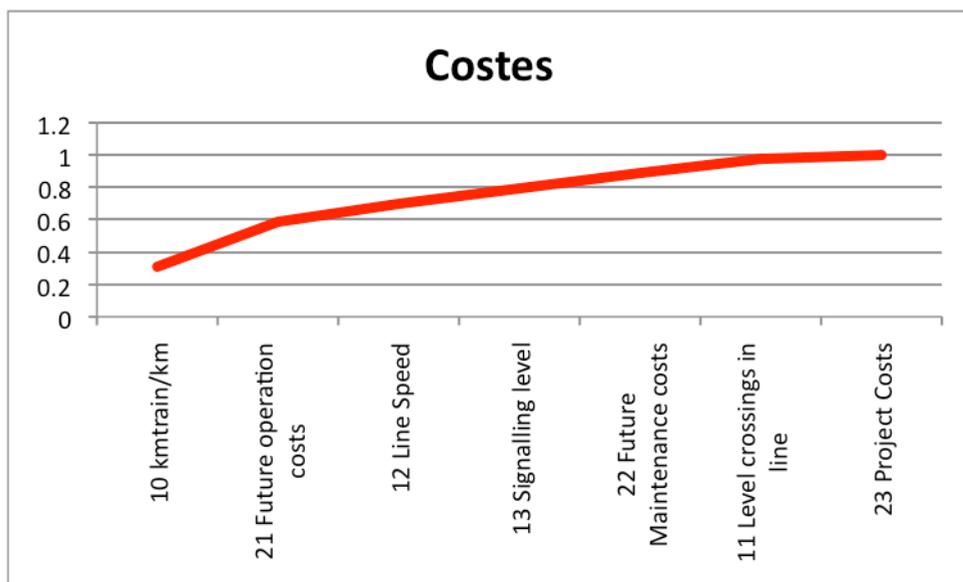


Figura 5 4 Aportación acumulada de cada criterio al total de la subred de costes

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

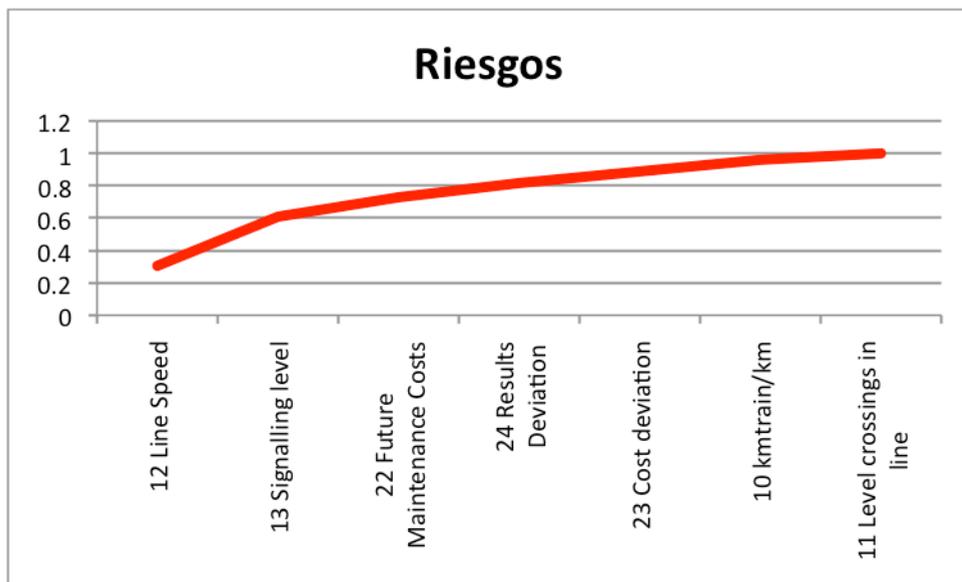


Figura 5 5 Aportación acumulada de cada criterio al total de la subred de riesgos

5.3.1.1 Análisis de pesos en la subred de beneficios.

En la subred de beneficios el criterio más importante con mucha diferencia es el criterio CTV.C12 Pasos a nivel en la línea, seguido aunque con mucha diferencia del criterio CTV.C14 Nivel de señalización y del CSC.C3 Mejora en los sistemas de ayuda a la conducción.

Esta prioridad, conjugada con la poca importancia de la reducción de PaN, incidencias y, en general, de los parámetros más vinculados al detalle de la actuación prevista, nos muestran que los beneficios a obtener están definidos, en mucha mayor medida, por el tipo de línea sobre la que se actúa que por el tipo de actuación a realizar. De los tres primeros criterios solo el tercero está vinculado directamente a la actuación.

Podemos concluir que existen líneas cuyas características las hacen especialmente susceptibles de ser beneficiadas por las actuaciones y que, sean como sean estas actuaciones, van a ser mucho más efectivas que en otras líneas. Esta conclusión es coherente con análisis previos y con las ideas transmitidas por el decisor. Cuando una línea tiene un nivel de

prestaciones bajo (definido básicamente por la existencia de Pasos a Nivel y un nivel de señalización bajo) cualquier actuación sobre ella va a tener una prioridad alta. Lo que también nos muestra este resultado es que no existe, o al menos no se percibe como tal por parte de los decisores, la existencia de amplias oportunidades de mejora por actuaciones sobre cualquier tipo de infraestructuras. Este resultado es esperable con el tipo de proyectos considerado, si tenemos en cuenta que las tecnologías implicadas en el sector ferroviario son muy maduras y las relaciones entre ellas son complejas, no existiendo un solo factor o deficiencia tecnológica que limite el desempeño de cualquier tipo de red y que permitiera una gran revolución.

La falta de estas deficiencias o puntos de mejora claros, pone más en valor la necesidad de usar sistemas de ayuda a la decisión multicriterio en este caso de estudio, para así poder evaluar adecuadamente y en su justa proporción las implicaciones de todos los factores que es necesario considerar.

5.3.1.2 *Análisis de pesos en la subred de oportunidades.*

Al estudiar cómo quedan priorizados los criterios utilizados en la subred de oportunidades, el principal criterio es el CTV.C14 nivel de señalización, seguido por la CET.C8 Reducción en el número de incidencias, el CML.C20 número de incidencias/km y el CTV.C11 kmtren/km. Como ha ocurrido ya en los beneficios, el nivel de señalización es fundamental para definir si un tramo de línea requiere actuaciones sobre él. El nivel de señalización nos marca la capacidad real del tramo de estudio, su robustez frente a incidencias y el nivel de seguridad. En general, cuanto más intensivo sea el uso (mayor número de kmtren/km) y mayor sea el número de incidencias, más efectivas pueden ser las medidas sobre él. En el ámbito de los sistemas de transporte, uno de los problemas clásicos es ajustar la capacidad de la infraestructura a la demanda, ya que si la demanda es muy inferior a la capacidad tenemos un problema de costes de explotación demasiado altos, pero si la demanda se acerca demasiado a la capacidad máxima disminuye mucho la calidad del servicio, que se puede medir indirectamente por el número de incidencias.

5.3.1.3 *Análisis de pesos en la subred de Costes.*

Tanto en la red de costes como en la de riesgos la valoración es diferente, los criterios de mayor peso son los que tienen más influencia en el aumento de los costes. De forma lógica con la percepción previa el criterio CEE.C23 costes de explotación futuros tienen una gran importancia frente a todos los demás, dominando claramente toda la subred. Tras ella el uso de la red (CTV.C11 kmtren/km) tiene mucha importancia, teniendo entre ambos cerca del 50% del peso. Los dos siguientes factores de importancia, la velocidad de la línea y el nivel de señalización son características del tramo.

En los estudios realizados sobre costes de mantenimiento de infraestructuras ferroviarias (Johansson & Nilsson, 2004), uno de los factores más importantes es el uso de la infraestructura, aumentando el coste y las necesidades de mantenimiento a medida que aumenta este.

El coste de explotación futuro no se compone solo de los costes de mantenimiento, sino que incluye otros costes vinculados con el personal y con la gestión no tan directamente vinculados a la tecnología. Un ejemplo clásico es el montaje de sistemas de telemando, tanto en electrificación (subestaciones y seccionadores, reduciendo las necesidades de personal para gestionar la energía y reduciendo los tiempos de actuación en la regulación y en las incidencias relacionadas) como en señalización (eliminación de la presencia de personal de regulación del tráfico en las estaciones, uso de automatismos para generar rutas y detección remota de incidencias)

El nivel de señalización, con las tecnologías actuales, implica que, para aumentar la capacidad y mejorar la gestión del tráfico ferroviario es necesario aumentar el número de elementos en vía (señales, circuitos de vía, cabinas de enclavamiento, balizas) y pese al alto nivel de disponibilidad individual de cada elemento, al aumentar el número de elementos aumentan las necesidades de mantenimiento y el coste total del sistema. Actualmente, las innovaciones tecnológicas en el ámbito de la señalización ferroviaria están dirigidas hacia mantener el mismo nivel de capacidad y seguridad, reduciendo significativamente el número de elementos en vía y sus necesidades de mantenimiento. Por ejemplo, el desarrollo de sistemas de ayuda a la conducción y de conducción automática basados en comunicaciones, CBTC (Communications Based Train Control) para metros y el estándar europeo ERTMS N3 para líneas principales se basan en la comunicación bidireccional entre tren y puesto

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

de regulación para la localización y regulación de los trenes sin necesidad de enclavamientos, circuitos de vía y señales, reduciendo significativamente la cantidad de elementos en vía.

5.3.1.4 *Análisis de pesos en la subred de riesgos.*

En esta Subred los criterios de mayor prioridad son muy similares a la subred de costes, aunque los pesos relativos son muy diferentes, ya que tanto el CTV.C13 Velocidad de la línea como el CTV.C14 Nivel de señalización tienen peso similares y mucho mayores que el resto de criterios. El tercer criterio más importante son los CEE.C24 Costes de mantenimiento futuro. La causa de estos pesos se debe a que cuanto mayor sea el nivel de velocidad y el de señalización, existe más riesgo de que la actuación tenga un efecto negativo sobre el tramo. En los tramos de peores características hay menor riesgo de empeorar las capacidades de la infraestructura.

5.4. Ponderación de las categorías.

La ponderación de las categorías es independiente de la participación del criterio en diferentes modelos.

La descripción de los criterios y las categorías empleadas para cada uno de ellos se ha realizado en el apartado 4.3.1 y 4.4.

5.4.1. Ponderación de las categorías para la jerarquía AHP y ANP-BC.

En la Tabla 5 29 se incluyen las categorías consideradas con su ponderación para los criterios utilizados en el modelo AHP y ANP-BC.

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

CSC.C1.- Reducción del número de pasos a nivel.				
Total (1)	Significativo (0.401)	Parcial (0.172)	Indiferente (0.074)	Aumento (0.027)
CSC.C2.- Mejora de la señalización de pasos a nivel.				
Muy alto (1)	Alto (0.637)	Significativo (0.222)	Despreciable (0.112)	Reducción (0.06)
CSC.C3.- Mejora de los sistemas de ayuda a la conducción.				
Muy alto (1)	Alto (0.513)	Significativo (0.254)	Despreciable (0.145)	Reducción (0.06)
CSC.C4.- Automatización de Itinerarios y bloqueos.				
Muy alto (1)	Alto (0.486)	Significativo (0.493)	Despreciable (0.059)	
CSE.C5.- Reducción de los tiempos de viaje.				
Mayor que 20% (1)	Mayor que 10% (0.509)	Mayor que 5% (0.251)	Menor que 1% (0.124)	Reducción (0.065)
CSE.C6.- Reducción del cantón crítico.				
Mayor que 20% (1)	Mayor que 10% (0.517)	Mayor que 5% (0.256)	Menor que 1% (0.164)	Reducción (0.057)
CSE.C15.- Aumento del número de circulaciones.				
Mayor que 100% (1)	Mayor que 50% (0.412982)	Mayor que 20% (0.234117)	Mayor que 10% (0.119858)	Reducción (0.01096)
CSE.C7.- Mejora de los sistemas de explotación.				
Muy alto (1)	Alto (0.464)	Significativo (0.208)	Despreciable (0.098)	
CET.C8.- Reducción en el número de incidencias.				

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

Mayor que 50% (1)	Mayor que 20% (0.509)	Mayor que 10% (0.251)	Menor que 1% (0.123)	Aumento (0.065)	
CET.C9.- Reducción de los retrasos.					
Mayor que 50% (1)	Mayor que 25% (0.52)	Mayor que 10% (0.572)	Menor que 5% (0.08)	Aumento (0.059)	
CET.C16.- Reducción de los costes de mantenimiento.					
Mayor que 50% (1)	Mayor que 25% (0.795)	Mayor que 10% (0.426)	Menor que 1% (0.218)	Incremento 10% (0.113)	Incremento 20% (0.064)
CET.C34 Mejora de la diagnosis del equipamiento.					
Muy alto (1)	Alto (0.51)	Significativo (0.251)	Despreciable (0.123)	Reducción (0.065)	
CUS.C35.- Mejora de las comunicaciones entre los municipios.					
Muy alto (1)	Alto (0.51)	Significativo (0.251)	Despreciable (0.123)	Reducción (0.065)	
CUS.C10.- Mejora de la seguridad vial del entorno.					
Muy alto (1)	Alto (0.51)	Significativo (0.251)	Despreciable (0.123)	Reducción (0.065)	
CUS.C27.- Mejora de la permeabilidad urbana.					
Muy alto (1)	Alto (0.51)	Significativo (0.251)	Despreciable (0.123)	Reducción (0.065)	
CSA.C29.- Reducción de los contaminación acústica.					
Muy alto (1)	Alto (0.51)	Significativo (0.251)	Despreciable (0.123)	Reducción (0.065)	
CSA.C30.- Mejora de la eficiencia energética.					
Mayor que 20%	Mayor que 10%	Mayor que 5%	Menor que 1%	Reducción	

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

(1)	(0.51)	(0.251)	(0.123)	(0.065)	
CSA.C31.- Reducción Impacto ambiental durante la actuación.					
Muy alto (0.065)	Alto (0.123)	Medio (0.251)	Bajo (0.51)	Despreciable (1)	
CSA.C32.- Reducción impacto ambiental FFCC.					
Muy alto (1)	Alto (0.51)	Significativo (0.251)	Despreciable (0.123)	Aumento (0.065)	
CEE.C22.- Coste de la actuación de mejora					
Mayor que 45 M€ (0.226)	Mayor que 25 M€ (1)	Mayor que 15 M€ (0.637)	Mayor que 7 M€ (0.262)	Mayor que 3 M€ (0.11)	Menor que 3 M€ (0.051)
CEE.C17.- Coste de Mejoras subsiguientes.					
Muy alto (0.075)	Alto (0.156)	Importante (0.293)	Despreciable (1)		
CEE.C23.- Coste de explotación futura.					
Mayor que 120% (0.111)	Mayor que 110% (0.202)	Mayor que 100% (0.851)	Mayor que 80% (1)	Mayor que 60% (0.487)	Mayor que 50% (0.403)
CEE.C28.- Tiempo de amortización de la actuación.					
Mayor que 50 Años (0.12)	Mayor que 30 Años (0.559)	Mayor que 20 Años (1)	Mayor que 10 Años (0.788)	Mayor que 5 Años (0.401)	Menor que 5 Años (0.182)
CTV.C33 Criterio tramo de vía					
Líneas Troncales de buenas prestaciones (0.125)	Líneas troncales con pasos a nivel (1)	Líneas troncales de vía única (0.318)	Líneas troncales de alta incidencia (0.526)	Líneas secundarias (0.078)	Ramales técnicos (0.031)

Tabla 5 28 Valoración de las categorías utilizadas en el modelo AHP.

La definición de las categorías consideradas en cada criterio ya se ha realizado en el estudio de los criterios usados, por lo que en este apartado solo se estudian los pesos de cada una de las categorías y su implicación en el tipo de actuaciones más deseable.

Las tablas de comparaciones pareadas que han generado estos pesos se incluyen en el Anexo 2.

En general la mayoría de las relaciones entre las categorías consideradas son lineales, es decir, el salto de una categoría a otra aumenta o disminuye proporcionalmente la prioridad de la categoría. Algo esperable en el caso de conceptos que mejoran de forma lineal, como casi todos los conceptos definidos en los criterios.

Los conceptos que aumentan linealmente son: las evaluaciones de las categorías más conceptuales y las evaluaciones de conceptos numéricos de cambio lineal como, por ejemplo, CSE.C5 Reducción de tiempos de viaje, CSE.C6 Reducción del cantón crítico, CMU.C15 Aumento del número de circulaciones, CMU.C8 Reducción del número de incidencias y CSA.C30 Mejora eficiencia energética.

Fuera de éstos, tenemos valores numéricos y conceptuales con categorías no lineales, como el CEE.C22 Coste de la actuación. El decisor comentó que la distribución le resultaba lógica con respecto al tipo de actuaciones consideradas porque las actuaciones demasiado caras o demasiado baratas no suelen resultar interesantes por no acometer reformas de envergadura o porque las actuaciones demasiado costosas comprometen una cantidad de recursos muy grande en una zona muy reducida.

El comprometer una cantidad de recursos demasiado grande en un solo tramo aunque mejora este, genera un efecto muy reducido sobre el desempeño de la red ferroviaria, que depende mucho del efecto red. Por poner un ejemplo, convertir un tramo de vía de carril de 45 kg/m con traviesa de madera a carril de 60 kg/m con traviesa de hormigón es muy costoso, mientras que si se sustituye por carril de 54 con traviesa RS se sigue mejorando la calidad de la infraestructura y con el mismo coste total se puede actuar sobre dos tramos.

De la misma forma, existe un coste mínimo para una actuación por poco importante que sea, con lo que una vez que se actúa conviene que esta actuación sea lo más grande posible, sin separarse demasiado de los parámetros de calidad del resto de la red, por los problemas antes mencionados. Esto nos indica que, para conseguir mejoras significativas de calidad hemos de realizar actuaciones sobre los puntos por debajo del nivel medio, o una actuación general sobre toda la línea que la lleve a un

nuevo nivel medio superior, no teniendo réditos mantener una red desigual en cuanto a sus características.

El criterio coste de explotación futura nos marca la previsión de coste tras realizar la actuación. No existen grandes diferencias de valoración, sobre todo en las categorías de coste de explotación reducido. Evidentemente, el aumento de coste de explotación es mucho menos deseable que las reducciones, pero una reducción de coste de explotación muy grande no es mucho más deseable que una menor, debido a que la experiencia del decisor dice que las reducciones de coste para situarlos a niveles por debajo del 80% no son posibles. Las reducciones de coste de explotación mucho mayores no se alcanzan fácilmente solo con obras o cambios en la infraestructura, sino que ya implican cambios en el sistema de gestión del personal, material, incidencias u otros factores que escapan al ámbito de la selección de las actuaciones de mejora.

Pese a ello siguen siendo deseables, aunque debido a la poca confianza en dichas reducciones su peso baja frente a las alternativas más creíbles.

Este reparto de pesos ha cambiado en los últimos años, ya que, cuando se pusieron en marcha los primeros proyectos de eliminación de pasos a nivel guardados, donde se suprimía la operación manual de los pasos a nivel por PaN automatizados, por el elevado coste del personal necesario, el plazo de amortización de un PaN automatizado era del orden de 1 año. En la misma época la automatización y telemando de las subestaciones tenía plazos de amortización similares, por lo que en ese momento el reparto de pesos en los plazos de amortización sería muy diferente. Esto demuestra que aunque la jerarquía usada se pueda mantener en el tiempo, los pesos de los criterios dependen de las alternativas existentes y de la experiencia de aplicación de proyectos similares, tanto en costes como en resultados.

Este resultado demuestra que el uso del ANP-BOCR como herramienta de análisis de proyectos es capaz de evitar los sesgos más comunes y enfoca de manera similar a la propuesta de (Flyvbjerg, 2007b) de basarse en experiencias previas para realizar las estimaciones.

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

5.4.2. Ponderación de las categorías para ANP-BOCR

En la Tabla 5 29 se incluyen las categorías consideradas con su ponderación para los nuevos criterios utilizados en el modelo ANP-BOCR.

Las categorías y sus ponderaciones ya incluidas en los modelos previos se utilizan tal cual.

CTV.C11 kmtren/km				
Muy alto (1)	Alto (0.5111264)	Medio (0.206381)	Bajo (0.106345)	Muy bajo (0.087644)
CTV.C12 PaN en la línea.				
Más de 5 (1)	Más de 3 (0.375536)	Al menos 1 (0.091901)	Ninguno (0.079338)	
CTV.C13 Velocidad de la línea				
Mayor de 200 km/h (0.153252)	Mayor de 160 km/h (0.271230)	Mayor de 140 km/h (0.318028)	Mayor de 120 km/h (0.609427)	100 km/h o menos (1)
CTV.C14 Nivel de señalización				
ERTMS y ASFA (0.107747)	BAB/BAU (0.107747)	BAD (0.218540)	BLAU (0.388911)	Ninguno (1)
CML.C18.- Retrasos/km.				
Muy alto (1)	Alto (0.617992)	Medio (0.253852)	Bajo (0.081718)	Muy bajo (0.075814)
CML.C19.- Retrasos/kmtren.				
Muy alto (1)	Alto (0.604262)	Medio (0.213549)	Bajo (0.101047)	Muy bajo (0.094469)
CML.C20.- Incidencias/km.				

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

Muy alto (1)	Alto (0.511923)	Medio (0.272279)	Bajo (0.11551)	Muy bajo (0.106744)
CTV.C21 Incidencias/kmtren				
Muy alto (1)	Alto (0.528947)	Medio (0.293866)	Bajo (0.091504)	Muy bajo (0.085798)
CUF.C24 Costes de Mantenimiento futuros				
Mayor 150% (1)	Mayor 120% (0.824334)	Mayor 100% (0.353703)	Mayor 80% (0.248862)	Menor 80% (0.203030)
CVP.C25 Desviación en coste				
Mayor del 100% (1)	Mayor del 70% (0.446166)	Mayor del 50% (0.173904)	Mayor del 20% (0.199085)	Menos del 20% (0.199085)
CVP.C26 Desviación en resultados				
Mayor del 75% (1)	Mayor del 50% (0.538847)	Mayor del 25% (0.192814)	Mayor del 10% (0.129719)	Menor del 10% (0.098968)

Tabla 5 29 Valoración de las nuevas categorías empleadas en el modelo ANP-BOCR

5.5. Valoración de las alternativas.

5.5.1. Valoración de las alternativas según modelo AHP

A la hora de analizar las valoraciones y realizar los análisis de sensibilidad solo se van a incluir un grupo reducido de proyectos, seleccionados entre todo la lista de actuaciones Con esto resulta más sencillo mostrar el análisis.

Para el análisis general sí que se incluyen todas las alternativas evaluadas.

Actuación	Valoración	Ranking
32350X	1	1

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

31050X	0.921883	2
33800P	0.843595	3
31300X	0.744125	4
31300D	0.666213	5
32350G	0.652332	6
30850R	0.649123	7
32300V	0.631141	8
32300U	0.629941	9
30850O	0.613798	10
33800D	0.577203	11
31300N	0.574993	12
30802X	0.564718	13
33650H	0.51007	14
30850J	0.507649	15
30850I	0.50657	16
32350A	0.492691	17
31050B	0.486926	18
32150Y	0.452659	19
33800K	0.447606	20
33801L	0.271652	21
31250M	0.255119	22
31200H	0.241832	23
33801H	0.232454	24

Tabla 5 30 Valoración de las alternativas según AHP. Ordenadas

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

5.5.2. Valoración de las alternativas según el modelo ANP-BC

Actuación	Valoración	Ranking
32350G	1	1
33800P	0.7604	2
31300D	0.466181	3
32350X	0.395194	4
32350A	0.380199	5
31050X	0.337922	6
31300X	0.316445	7
30850R	0.233327	8
30850O	0.223818	9
30802X	0.197649	10
31300N	0.197583	11
32300U	0.183049	12
32300V	0.176414	13
33800D	0.167587	14
33650H	0.158887	15
33800K	0.145412	16
30850I	0.140073	17
30850J	0.140073	18
31050B	0.130001	19
32150Y	0.112653	20
31250M	0.103035	21
31200H	0.080788	22
33801L	0.061204	23
33801H	0.054238	24

Tabla 5 31 Valoración de las alternativas según ANP-BC. Ordenadas

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

Las mismas alternativas se van a usar en todos los modelos para poder comparar los cambios en las valoraciones.

ANP-BC			AHP	
Código	Valoración	Ranking	Valoración	Código
32350G	1	1	1	32350X
33800P	0.7604	2	0.921883	31050X
31300D	0.466181	3	0.843595	33800P
32350X	0.395194	4	0.744125	31300X
32350A	0.380199	5	0.666213	31300D
31050X	0.337922	6	0.652332	32350G
31300X	0.316445	7	0.649123	30850R
30850R	0.233327	8	0.631141	32300V
30850O	0.223818	9	0.629941	32300U
30802X	0.197649	10	0.613798	30850O
31300N	0.197583	11	0.577203	33800D
32300U	0.183049	12	0.574993	31300N
32300V	0.176414	13	0.564718	30802X
33800D	0.167587	14	0.51007	33650H
33650H	0.158887	15	0.507649	30850J
33800K	0.145412	16	0.50657	30850I
30850I	0.140073	17	0.492691	32350A
30850J	0.140073	18	0.486926	31050B
31050B	0.130001	19	0.452659	32150Y
32150Y	0.112653	20	0.447606	33800K
31250M	0.103035	21	0.271652	33801L
31200H	0.080788	22	0.255119	31250M
33801L	0.061204	23	0.241832	31200H

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

33801H	0.054238	24	0.232454	33801H
--------	----------	----	----------	--------

Tabla 5 32 Comparación entre valoraciones y ordenaciones según modelos AHP y ANP-BC

Con respecto a los resultados obtenidos con AHP, el cambio medio en la ordenación es de 3,75 puestos arriba o abajo. Las alternativas con menor peso siguen manteniéndose en su misma situación relativa, así como las alternativas de mayor peso, concentrándose el cambio de ordenación principalmente en las alternativas intermedias. El resultado muestra como no hay grandes cambios en la ordenación fundamental y en cuales son los criterios claves, los cambios en las valoraciones en los casos intermedios se deben a la excesiva dependencia de esos proyectos de buenas valoraciones en muy pocos criterios, que, al bajar de peso alteran en mucho la valoración de esos proyectos.

Los criterios cuya influencia era muy baja en AHP y en el modelo ANP-BC se han descartado en el modelo ANP-BOCR al considerarse que no eran relevantes y que con los nuevos criterios que se añadían se podían capturar todos los efectos significativos.

Los resultados muestran que ha habido modificaciones en las prioridades y en la importancia/influencia de los criterios. El estudio es relevante para el DM ya que en el análisis ANP ha surgido un grupo de criterios cuya influencia es prácticamente nula. Esto provoca una reflexión sobre la conveniencia o no de eliminar estos criterios del estudio con el fin de simplificar el problema, ya que la Empresa cada año ha de considerar un número muy alto de alternativas.

Los resultados son satisfactorios para el DM ya que considera que están alineados con su percepción inicial. Después de un análisis escrupuloso de los mismos observó que eran coherentes con su experiencia y conocimiento del problema. El DM también consideró que simplemente el estudio de influencias realizado con ANP, independientemente del resultado, ha sido útil por la reflexión que le ha obligado a hacer.

Con el método ANP-BC obtendremos entonces, una ordenación similar de los proyectos, descartando de forma mucho más eficiente proyectos poco interesantes y obteniendo un listado de proyectos clave similar en ambos métodos.

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

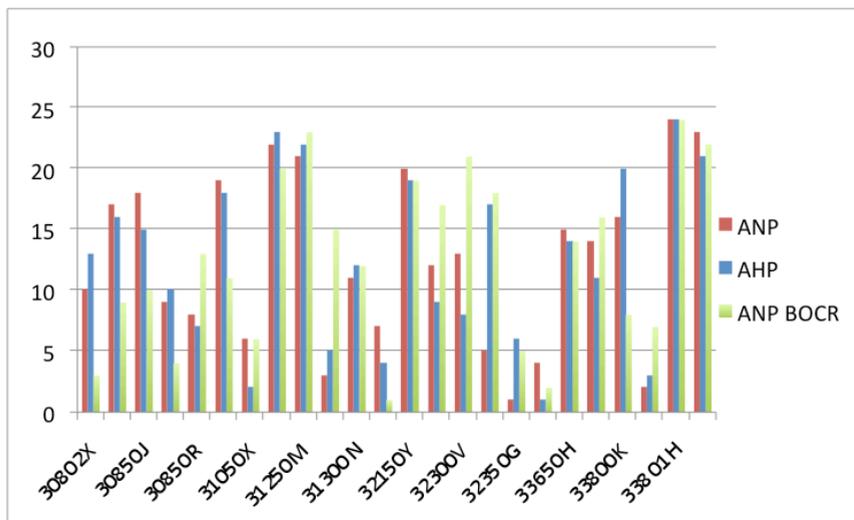


Figura 5 6 Comparativa de posición en la ordenación según el modelo utilizado

5.6. Análisis de las valoraciones obtenidas por los proyectos considerados en el modelo ANP-BOCR.

Considerando solo las 24 alternativas estudiadas antes:

Actuación	Valoración
32350X	1.000000
30850O	0.807188
32350G	0.707471
31300X	0.619077
30850R	0.571958
30850I	0.556709
30850J	0.556709
30802X	0.552556
33800K	0.540445
33800P	0.520047

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

33650H	0.437747
31050X	0.434076
32300U	0.433216
32350A	0.413354
33800D	0.390740
32300V	0.368572
32150Y	0.331940
31300N	0.326734
31050B	0.311047
31200H	0.266426
31250M	0.204096
33801L	0.171753
31300D	0.168729
33801H	0.129043

Tabla 5 33 Valoración de las alternativas significativas según ANP-BOCR

El total de proyectos considerados ha sido de 419 proyectos. El listado general se incluye en el anexo 1.

Una vez aplicado el modelo ANP-BOCR a esta cartera y normalizando los resultados obtenidos con el máximo, el ordenación obtenida se incluye en el Anexo 5.

5.6.1. Análisis de resultados del ANP-BOCR sobre el conjunto de alternativas.

Pasando al caso general, con las 419 alternativas consideradas de forma gráfica, en la Figura 5 7.

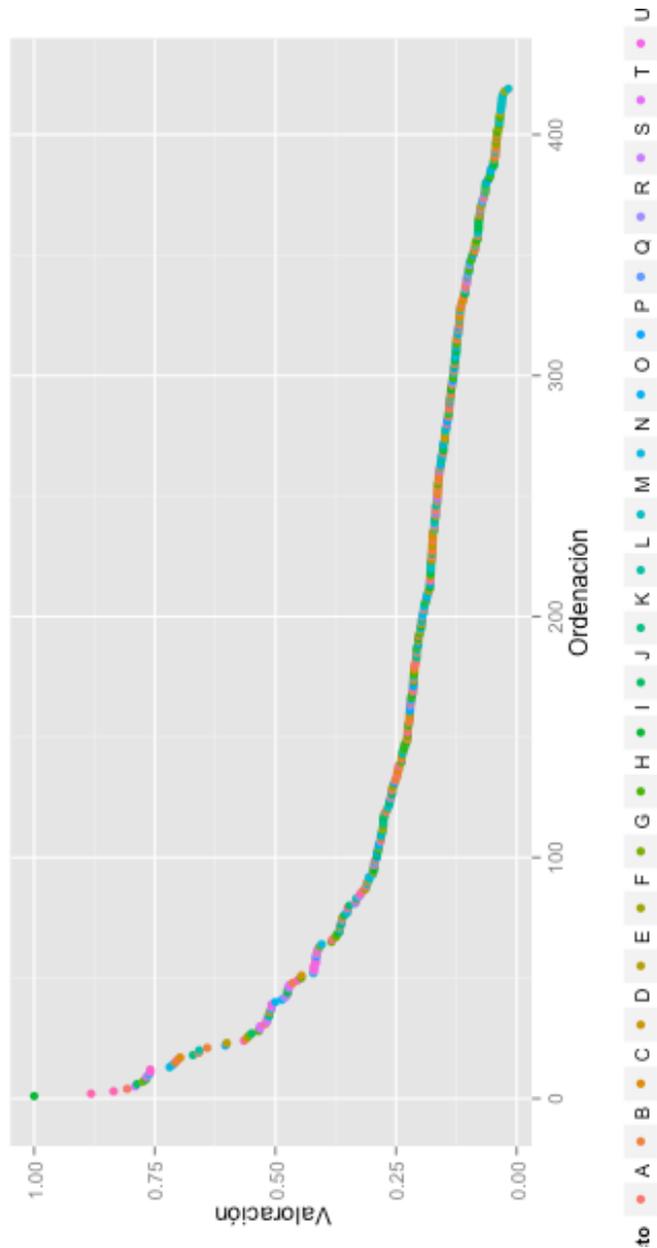


Figura 5 7 Ordenación de proyectos por valoración y tipo de proyecto

En la figura el código de color utilizado diferencia el tipo de proyecto considerado. En el código de cada proyecto la letra representa el tipo de

actuación considerada. Se puede ver que existe bastante variedad (colores) aunque algunos tipos de actuación suelen ocupar valores superiores.

Se observa que en la ordenación final no hay una discriminación por tipología de actuación.

Si representamos la misma figura pero usando los colores para representar tramos, tenemos la Figura 5 **8**.

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

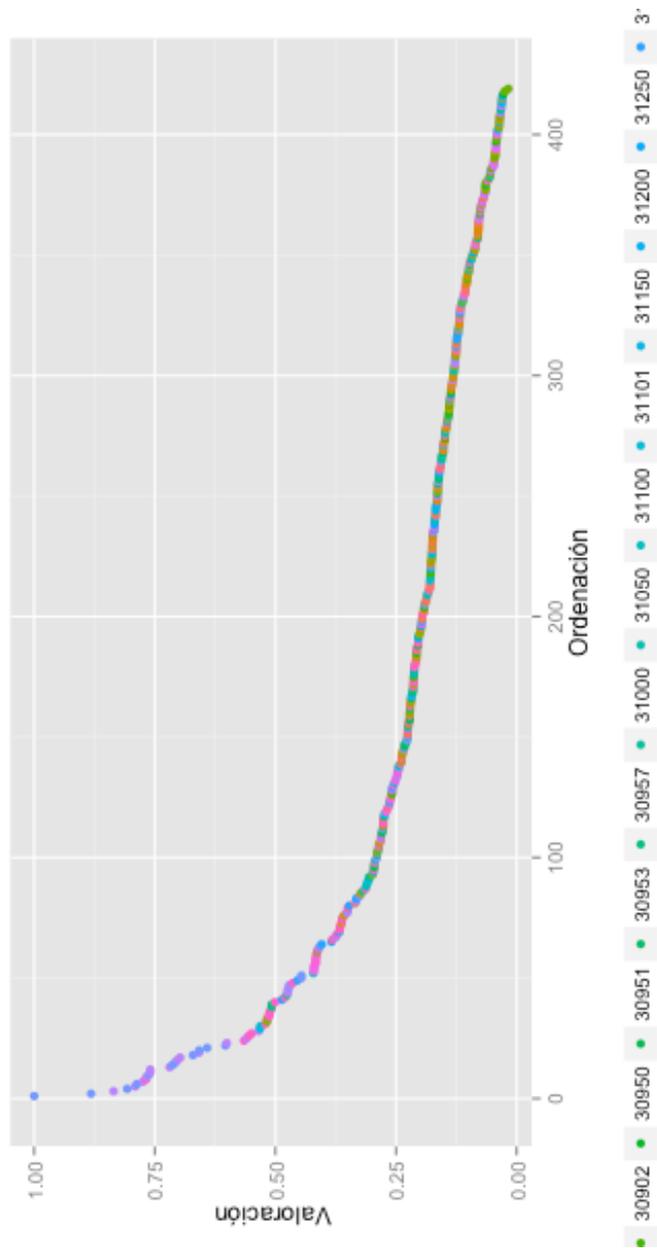


Figura 5 8 Ordenación de proyectos por valoración y línea

El código de color nos muestra que hay unos tramos con alta valoración diferenciándose del resto.

La forma de la figura se puede asimilar a una exponencial decreciente, una curva que se presenta a menudo en estas evaluaciones.

Para ver la importancia de las características del tramo de vía sobre la valoración, en la siguiente figura se agrupan los proyectos valorados por tramos (cada tramo un color), de forma que se pueda ver la variación de la valoración de los proyectos dentro de cada tramo.

En la Figura 5 9 sí que se puede ver claramente que, cada familia de proyectos similares tiene una variación muy grande, dependiendo mucho la valoración de la línea en la que este aplicado. Cada línea tiene mucha menos varianza interna. En general hay líneas con las valoraciones muy agrupadas para todos los proyectos y los mejores proyectos en general se dan en líneas con alta varianza entre sus proyectos, esto es, las líneas con buenos proyectos tienen proyectos (en valoración) de todo tipo pero las líneas con malos proyectos son mucho más homogéneas.

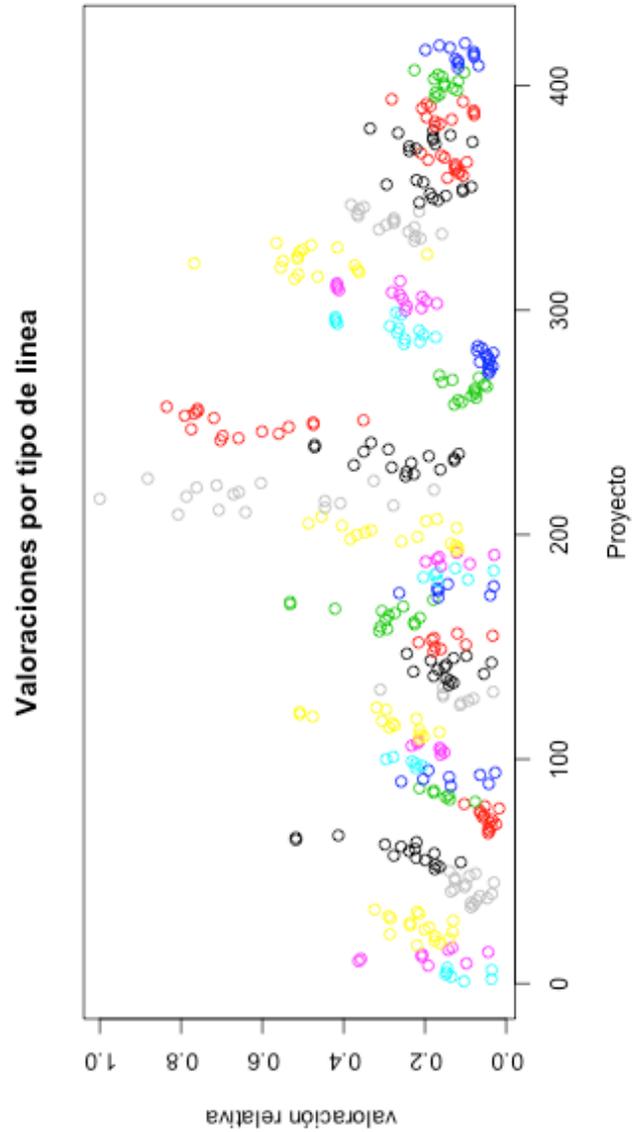


Figura 5 9 Valoraciones proyectos. El color representa proyectos sobre la misma línea.

Con estos resultados queda muy claro que la principal fuente de preferencia hacia un proyecto es su lugar de aplicación, mucho más que el tipo de proyecto en sí. Los proyectos peor valorados de las ubicaciones más interesantes son mejores que los mejores proyectos de las peores ubicaciones.

Esta forma de análisis también es útil porque una vez valorada, en función de otros condicionantes, además de la valoración multicriterio aquí considerada, pueden hacer que sea recomendable invertir en un tramo determinado. Tomándose la decisión sobre el proyecto específico solo sobre el conjunto de actuaciones posibles sobre ese tramo.

Se ha trabajado con una cartera real de 419 proyectos, que incluían todos los proyectos posibles técnicamente sobre la infraestructura responsabilidad del decisor. Ante la complejidad de mostrar los resultados de toda la cartera, en la siguiente tabla se muestran los proyectos que han resultado estar en las primeras 10 posiciones de la ordenación global.

Orden	Código proyecto	Valor
1	31300I	1.00000000
2	31300X	0.88195669
3	32300X	0.83540098
4	31300A	0.80720683
5	32300S	0.79078956
6	31300J	0.78677037
7	32300G	0.77467314
8	33800I	0.76796564
9	32300T	0.76711004
10	31300N	0.76167939

Tabla 5 34 Listado de los 10 proyectos con mejor valoración global.

El valor de la prioridad mostrado es el normalizado al valor máximo, para que se pueda evidenciar más fácilmente las diferencias cardinales entre unos y otros proyectos. El código que identifica a los proyectos ya ha

sido descrito anteriormente. Se utiliza el número de la línea para identificar a todos los proyectos sobre ese tramo y la letra para identificar el tipo de actuación que se realiza. Como se puede ver las primeras posiciones las ocupan proyectos de diferente tipo. El único tipo que se repite son proyectos de “supresión de pasos a nivel en tramos con un tráfico intenso (actuaciones tipo X)” y buenas características en los demás parámetros, en los que el número de pasos a nivel ya es reducido, quedando pasos con mucho tráfico de vehículos y que generan un alto número de incidencias e implicaciones a la seguridad.

Casi todos los proyectos situados en las 10 primeras posiciones actúan sobre dos tramos muy específicos, el tramo 31300 L’Aldea-Salou y el 32300 Buñol-Utiel. El primer tramo es una anomalía en la red, por ser un tramo con vía única en el corredor mediterráneo, con alto tráfico de trenes y que enlaza con tramos de vía doble dirección Valencia y ya fuera del ámbito de estudio en dirección Tarragona. Sus características son mucho peores que el resto de los tramos cercanos, al tener peores instalaciones tanto en vía como en electrificación, ser en vía única y tener presencia de pasos a nivel.

El tramo Buñol-Utiel está en el extremo de las cercanías de Valencia, con tráfico relativamente altos para una línea de bajo nivel de prestaciones. Como se ha comentado anteriormente las características de los tramos son claves para definir la valoración de los proyectos y en este caso, cualquier actuación sobre estas líneas mejorará mucho su desempeño.

Actualmente, se está duplicando la vía entre L’Aldea y Salou mediante la construcción de una variante y dentro de los proyectos en evaluación por la dirección de la empresa está la electrificación de la línea Valencia-Buñol y la ampliación de las cercanías hasta Utiel, que implica la renovación en profundidad de estas instalaciones. Ya que en su estado actual cumplen su función de forma limitada y no podrían asumir una mayor productividad con un nivel de calidad razonable.

Estos proyectos alcanzan las primeras posiciones no por tener un valor determinado muy alto en un criterio en particular, sino porque puntúan muy bien en todos los criterios. Son actuaciones relativamente baratas, con pocas posibilidades de grandes desviaciones en resultados y coste y que por experiencias anteriores se puede estimar que reducen el número de incidencias de forma muy importante y mejorar la productividad de la infraestructura en zonas saturadas.

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

Orden	Código proyecto	Valor
50	31300H	0.44625103
51	31300D	0.44600919
52	31101N	0.42131737
53	33600T	0.42003146
54	33600U	0.42003146
55	33600V	0.42003146
56	33650T	0.41635849
57	33650U	0.41635849
58	33650V	0.41635849
59	33800P	0.41529621

Tabla 5 35 Listado de 10 proyectos con valoración global intermedia.

El siguiente bloque de proyectos, Tabla 5 35 ya en posiciones medias ordinales de ejecución, incluye actuaciones en señalización y de mejora del desempeño de la red a un coste económico medio-alto, como el 33800P, la reducción del cantón crítico y construcción de puestos de bloqueo en la línea Silla-Gandia o el 33650T, la instalación de bloqueo automático en el tramo Ontinente-Alcoy. Estas actuaciones tienen una buena valoración, aunque se puede ver que es bastante baja en relación al máximo obtenido, con una buena valoración de un grupo de parámetros y bajas valoraciones en otros, por eso en este grupo nos vamos encontrando mezcladas actuaciones de diferente naturaleza. En esta zona de ordenación se encuentran mezclados proyectos con valoraciones similares pero que corresponden a tramos muy diferentes. Tenemos los peores proyectos de los mejores tramos mezclados con los mejores proyectos de los peores tramos.

Existen actuaciones que para mejorar la capacidad de la red aumentan el coste de mantenimiento y de explotación. En general estas actuaciones están más alejadas de los valores máximos de cada criterio, siendo su ordenación más dependiente de pequeñas variaciones en las valoraciones de criterios y/o alternativas. En la ordenación de este tipo de alternativas es donde realmente podemos ver la utilidad de los métodos de apoyo a la decisión multicriterio puesto que, en las situaciones habituales, con una

ordenación realizada por el decisor, los proyectos más interesantes suelen quedar en las primeras posiciones, mientras que son los proyectos con ordenaciones medias-altas son los que, al ser más sensibles a haber tenido en cuenta adecuadamente los parámetros que muestran sus virtudes, más fácilmente pueden ser valorados de forma incorrecta o no tenidos en cuenta.

Orden	Código proyecto	Valor
409	32500D	0.03334475
410	31100M	0.03311105
411	31000M	0.03203063
412	32500M	0.03172856
413	31200M	0.03081536
414	31150M	0.03073604
415	30850M	0.03027968
416	31250M	0.02931395
417	30950M	0.02702838
418	30900F	0.02470142
419	30900M	0.01728014

Tabla 5 36 Listado de los 10 proyectos con peor valoración global.

Finalmente hay una larga cola de proyectos con valoraciones muy bajas, del orden del 10% de la valoración del proyecto máximo, como el 32350A, la renovación de vía con carril UIC-60 y traviesa de hormigón entre Vara de Quart y Buñol o el 31250M, construcción de una subestación adicional entre L'Aldea y Ulldecona. Estas actuaciones, no tienen buena valoración en casi ninguno de los criterios, suelen ser actuaciones económicamente caras y complejas y los beneficios a obtener suelen ser muy reducidos o casi nulos.

En los últimos puestos del listado dominan los proyectos de construcción de subestaciones. Esta situación ya se ha indicado antes.

Además de los expuestos, entre las posiciones con una valoración inferior al 10% dominan los proyectos de infraestructura puros, como las

renovaciones de vía, la sustitución de desvíos y el tratamiento de infraestructura. Esta situación se basa en gran parte en que, en los últimos años, en la zona estudiada, se ha renovado la vía en profundidad, al producirse la adaptación a 200 km/h. Exceptuando zonas marginales, como la línea Játiva-Alcoy, la infraestructura no es un factor limitante para la explotación de la red. Es de esperar que, en otros ámbitos territoriales donde no se ha producido esta renovación, los proyectos de mejora de infraestructura de vía sean mejor valorados, con el mismo modelo de análisis.

Las actuaciones de las últimas posiciones son irrelevantes y no hay ningún cambio esperable en los pesos de los criterios ni de las alternativas que las convierta en relevantes, pero, al haberlas estudiado podemos tener la certeza de haber realizado el estudio completo y de no haber desechado ninguna alternativa por irrelevante sin haber tenido en cuenta sus características.

5.6.2. Análisis de las valoraciones por Subredes del conjunto total de actuaciones.

Para ver el efecto de cada una de las subredes, se incluyen los siguientes gráficos, que muestran la valoración de los proyectos, por orden general en cada una de las subredes.

Los gráficos se han obtenido representando en primer lugar el histograma de la frecuencia de las valoraciones para cada una de los subredes y en segundo lugar la relación entre la valoración global de cada proyecto y la valoración de cada subred.

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

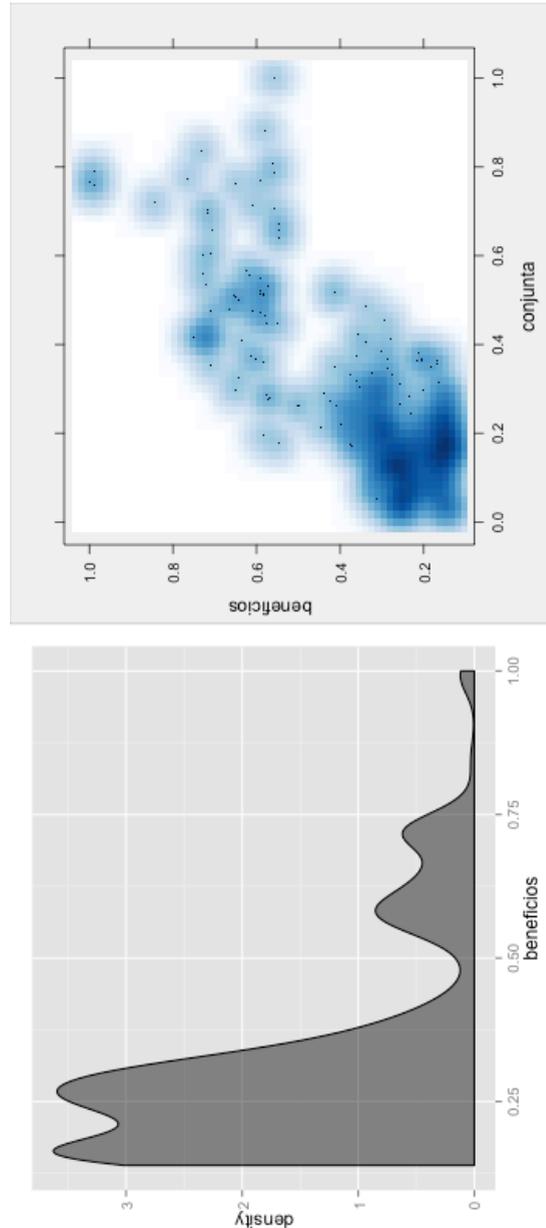


Figura 5 10 Densidad de los beneficios de los proyectos y relación con la valoración total.

En el caso de los beneficios se puede observar que los pesos obtenidos son muy similares a los de la ordenación y que en general hay tres grandes grupos, los proyectos por encima del 80%, pocos y en las primeras posiciones en la ordenación general, los proyectos entre el 80% y el 50% de valoración, que, excepto dos excepciones, representan los proyectos que tienen buenas valoraciones globales y el resto, donde la distribución de las valoraciones es casi uniforme. Este resultado muestra que la valoración de los beneficios domina sobre el resto y que un buen comportamiento en los beneficios va a clasificar un proyecto como bueno casi con total seguridad.

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

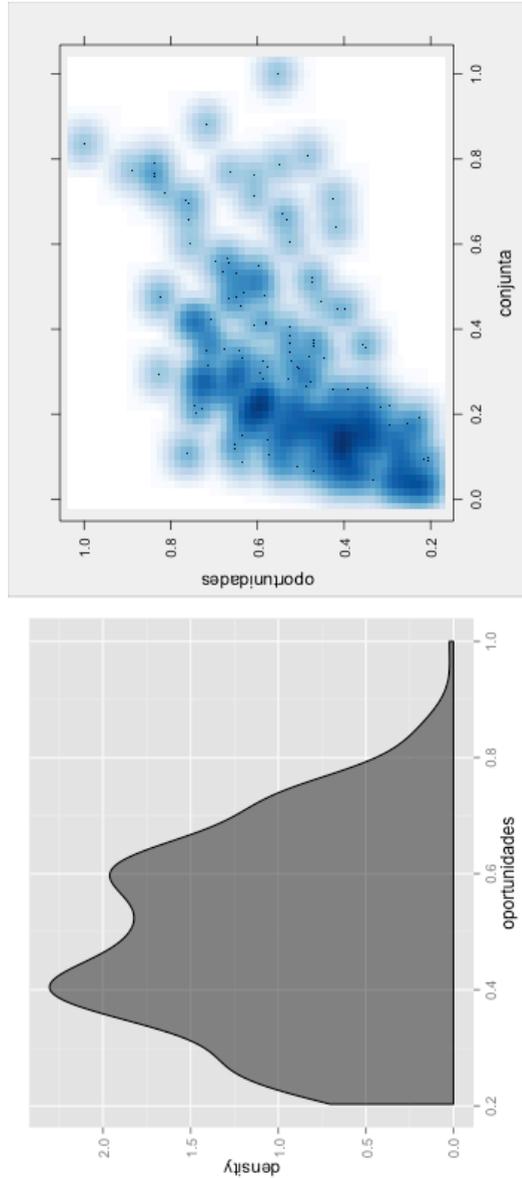


Figura 5 11 Densidad de las oportunidades de los proyectos y relación con la valoración total

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

Para la valoración de las oportunidades se puede ver que la evolución de los proyectos es más lineal, aun con una gran varianza. Pese a que existen proyectos de baja ordenación que tienen buena puntuación en los criterios de oportunidades, una mala valoración descarta de los primeros puestos en la ordenación. Este resultado es lógico, si se piensa que, proyectos con puntuaciones similares en beneficios tienen ordenaciones diferentes, precisamente por el efecto corrector de las oportunidades.

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

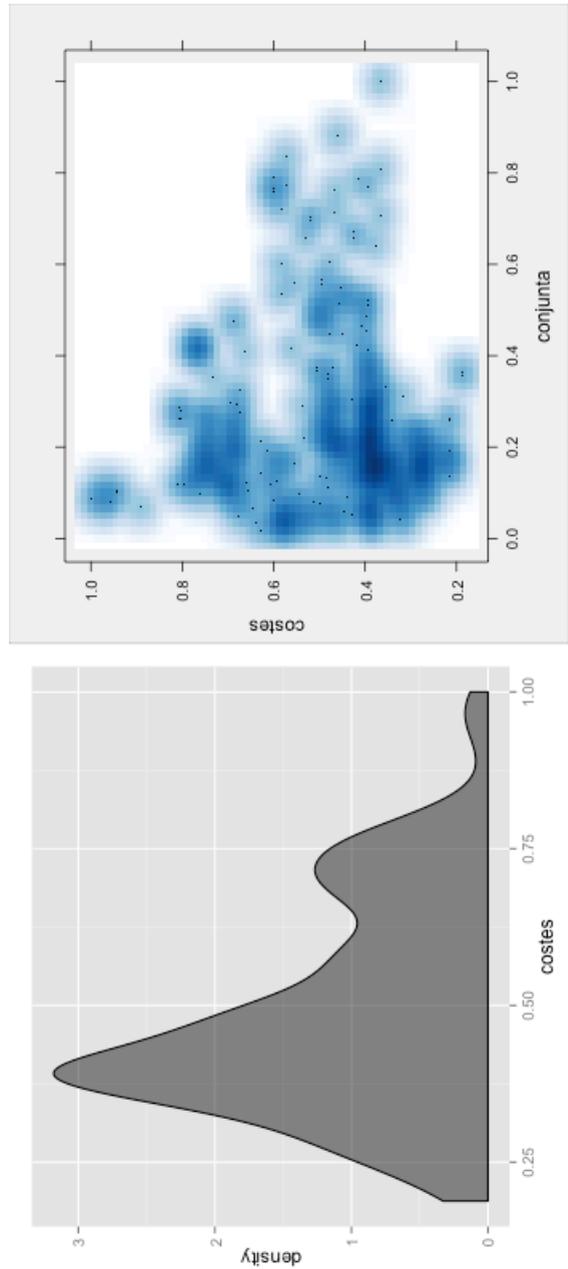


Figura 5 12 Densidad de los costes de los proyectos y relación con la valoración total.

Para el caso de los costes la distribución es más uniforme, excepto en los casos más extremos. Los proyectos con mejor valoración general tienen un rango de costes muy acotado, pero, curiosamente, no demasiado bajo, aumentando mucho la varianza al ir bajando en la ordenación. Es de destacar que los proyectos con costes muy bajos no aparecen hasta posiciones bastante avanzadas en la ordenación, posiciones de 80 en adelante y realmente hasta la posición 120 no se hacen más comunes. En teoría sería esperable que, si las valoraciones de costes y beneficios fueran totalmente independientes, existiera algún proyecto de bajo coste y altos beneficios entre los primeros. El hecho de no aparecer ese tipo de proyectos nos puede indicar que existe una relación entre los beneficios a conseguir por una actuación y el coste de esta, no existiendo los proyectos muy beneficiosos de bajo coste. Esta relación puede tener un origen de sesgo, ya que, ese tipo de actuaciones ya se han realizado, al ser los resultados positivos más evidentes y por eso no aparecen en la cartera actual.

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

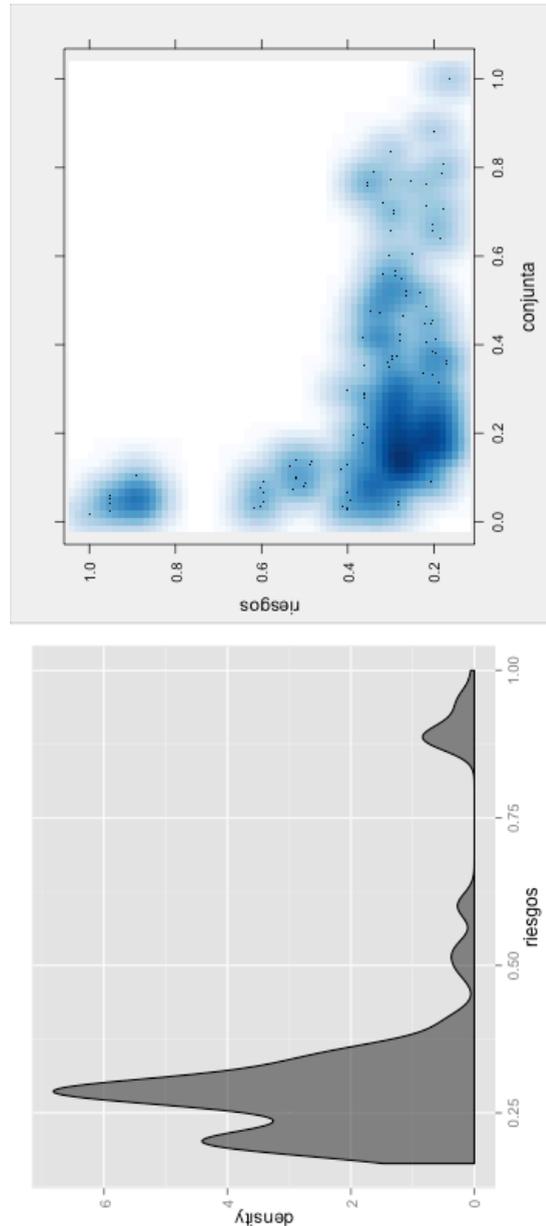


Figura 5 13 Densidad de los riesgos de los proyectos y relación con la valoración total

En el caso de los riesgos tenemos el caso inverso al de los beneficios, con casi todos los proyectos situados en un rango reducido en todos los niveles de valoración y solo apareciendo valores altos en el cuartil final de proyectos, donde se encuentran riesgos en tres niveles diferenciados.

Ante estos resultados se puede deducir que, descartado proyectos claramente muy arriesgados en sus resultados, el nivel de riesgo de casi todos los proyectos de la cartera con posibilidades de ejecución es muy similar. Esta observación es coherente con ciertas limitaciones introducidas en la selección de la cartera de proyectos, puesto que solo se han seleccionado proyectos de tecnologías probadas y soluciones técnicas no experimentales, con lo que el riesgo se debe básicamente a las condiciones del tramo y la eficacia de las medidas de la actuación sobre ese tramo en cuestión, incertidumbre dinámicas según la clasificación de (Koppenjan, Veeneman, van der Voort, ten Heuvelhof, & Leijten, 2011).

5.6.3. Importancia del tipo de línea y del tipo de proyecto sobre las valoraciones obtenidas.

Aunque ya se ha comentado la valoración obtenida de cada proyecto en relación con el tipo de tramo, los resultados obtenidos son los siguientes. Mostrados en la figura 5-12.

Cuando se estudia el rango de variación de las puntuaciones de las actuaciones según el tipo de actuación se observa que hay mucha variación según el tipo de proyecto y dentro de cada tipo.

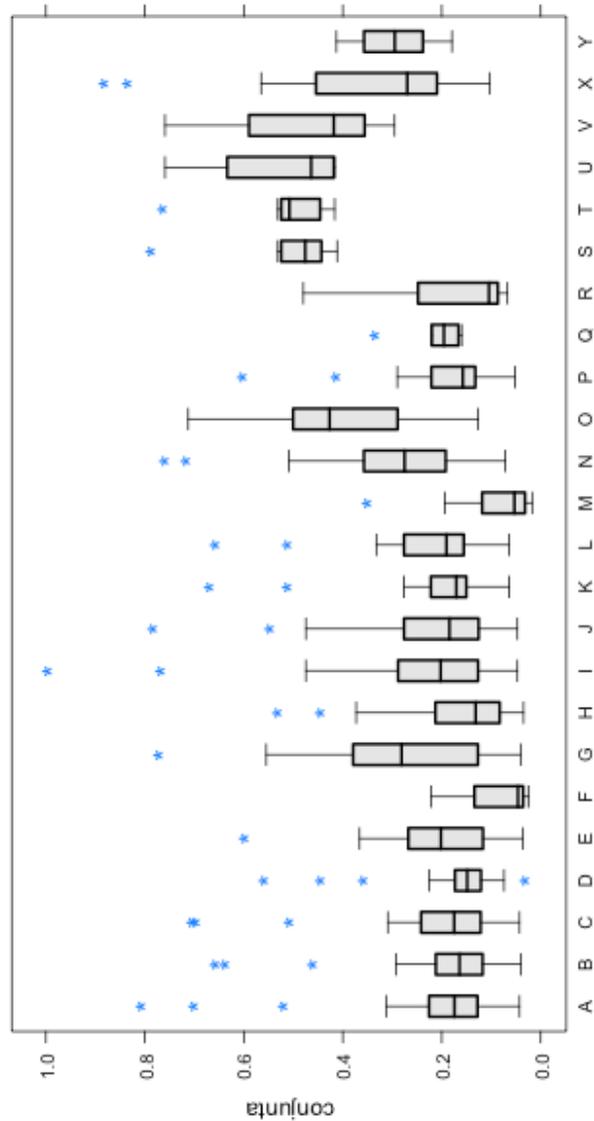


Figura 5 14 . Diagrama de cajas y barras de la densidad de las valoraciones conjuntas de cada tipo de proyecto.

Casi todos los proyectos mejor valorados son excepciones dentro de su rango de distribución, pero hay claramente una serie de proyectos tipo que son más recomendables.

Los proyectos tipo más recomendables son las supresiones de bloqueos telefónicos y su sustitución por los diferentes tipos de bloqueos automáticos, las supresiones de paso a nivel y la instalación de tren tierra.

Los proyectos menos favorables son casos como la construcción de nuevas subestaciones (M), que no tiene apenas interés, lo que tiene sentido ya que la existencia de subestaciones adicionales a las necesarias aporta muy poco beneficio adicional y representa un aumento de coste de mantenimiento relativamente importante.

El caso de los proyectos de sustitución del BLAU por BAU (Q) también es curioso. Parece indicar que, una vez tenemos un sistema de bloqueo automático, no hay interés en sustituirlo por otro más potente, a no ser que haya limitaciones de capacidad. Dado que el enfoque de esta tesis es desde el punto de vista de explotación y mantenimiento en las condiciones existentes, las limitaciones de capacidad no tienen un gran efecto, puesto que los servicios existentes están adaptados a la capacidad máxima en ese momento. Este tipo de proyectos tienen más sentido dentro de una política de aumento de servicios. Si se quiere ampliar el número de trenes que pasan por una línea a niveles superiores a los permitidos actualmente es cuando nos encontraríamos este tipo de problemas, que se escapan del alcance de la tesis.

Es de reseñar que, por un lado, la supresión de bloqueos telefónicos es muy recomendable, y por otro lado, la mejora de los sistemas de bloqueo en servicio no es recomendable genericamente. Esta aparente contradicción se resuelve si tenemos en cuenta que el paso de BT a cualquier bloqueo automático implica un cambio muy grande en costes de explotación y un aumento muy importante de la seguridad. Estos dos factores cambian muy marginalmente al mejorar el tipo de bloqueo, cambiando principalmente la capacidad, que, como se acaba de comentar, no es un factor clave en el análisis desde un punto de vista de mantenimiento.

Si hacemos la figura equivalente estudiando las diferencias de valoración por líneas, llegamos a las mismas conclusiones.

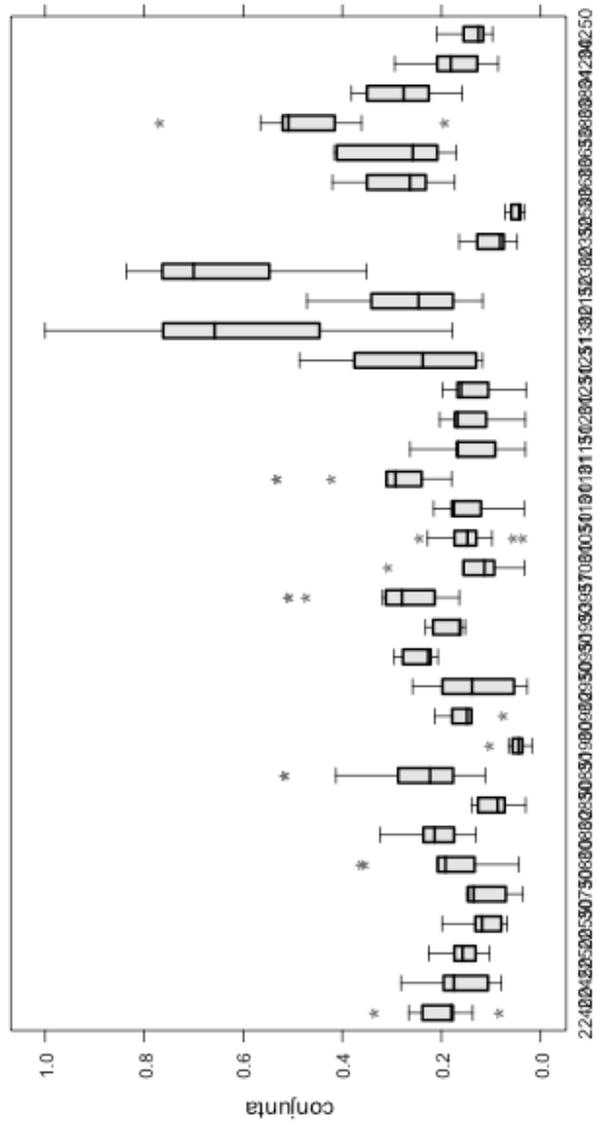


Figura 5 15 Diagrama de cajas y barras de la densidad de las valoraciones conjuntas de cada línea.

Observando los proyectos de esta forma es evidente que existe una concentración espacial de los mejores proyectos. Realizar varios proyectos simultáneos sobre un mismo tramo no es recomendable sin una evaluación del efecto conjunto sobre el tramo y la red ya que se contradice uno de los axiomas de la selección multicriterio implícitos en este trabajo (Saaty, 2008a), la independencia de las alternativas. Cada vez que se realice uno de los proyectos sobre un tramo, se debería realizar todo el análisis de nuevo. Lo esperable es que, una vez realizados los mejores proyectos sobre un tramo, la valoración de proyectos posteriores en ese mismo tramo baje y la varianza de las valoraciones de los proyectos baje y se vaya asimilando a trayectos más maduros en cuanto al estado de sus instalaciones.

La existencia de líneas con valoraciones muy altas de todos sus proyectos refleja una necesidad acuciante de mejora en ellas. Las líneas con valoraciones uniformes y bajas representan zonas con pocas posibilidades de mejora.

Una aplicación correcta y sistemática de estos métodos de evaluación multicriterio se reflejaría en una reducción de las diferencias entre los mejores tramos para actuar y los tramos medios, aumentando la valoración de los proyectos especialmente buenos para un tramo (marcados con un asterisco en la figura) frente al resto de posibilidades para el mismo tramo.

5.6.4. Conversión de los proyectos priorizados en una cartera optima.

Siguiendo el modelo de gestión de programas propuesto por (Thiry, 2004) hemos ordenado los proyectos de forma aislada, con unos criterios comunes, marcados por los objetivos generales de la división de mantenimiento de ADIF, pero, previo al comienzo de la ejecución hemos de eliminar de nuestro listado los proyectos que no tenga sentido su ejecución por ser incompatibles con proyectos de mayor prioridad.

Para realizar este filtrado se han analizado los tipos de proyectos, presentados en el Anexo 1 y se ha generado una matriz de incompatibilidades entre ellos. Las incompatibilidades se basan en que unos proyectos son alternativa a otros, son diferentes soluciones de mejora a un mismo problema. Si un proyecto tiene más prioridad que una

solución alternativa es porque es una solución más adaptada, no teniendo sentido figurar en el listado de proyectos ambas soluciones, sino que solo se debe incluir la mejor entre las alternativas. Es decir, hay proyectos que si se ejecutan, provocan que ya no tenga sentido ejecutarse otros.

Dado que la forma de generar las alternativas es aplicar todos los tipos de proyectos sobre todas las líneas, las incompatibilidades solo se presentan dentro de una misma línea, ya que los proyectos sobre líneas diferentes son, de forma general, completamente independientes entre sí.

La matriz de incompatibilidades se ha generado por el juicio experto del decisor, basado en las características de cada tipo de proyecto. La matriz se incluye en el anexo 6.

Las incompatibilidades se agrupan en 5 clusters de tipos de proyectos relacionados.

- Proyectos de renovación de vía de varios tipos, A, B , C, incompatibles entre sí, al ser diferentes soluciones técnicas con el mismo propósito pero diferente coste y resultado.
- Renovaciones de desvíos. Actuaciones parciales que, cuando hay actuaciones de renovación de vía ya están incluidos dentro de estas.
- Proyectos de renovación de catenaria, I y J, incompatibles entre sí de forma similar a las renovaciones de vía.
- Las actuaciones tipo O (cambio de bloqueo eléctrico por electrónico), que no tienen sentido si ya se ha realizado Q o R (cambio del tipo de bloqueo BAD a BAB), por ser actuaciones más generales que las incluyen.
- La familia de proyectos de sustitución de bloqueo telefónico por cualquiera de las alternativas: S, T, U, V, diferentes soluciones técnicas para el mismo problema con diferente resultado.

El algoritmo de incompatibilidad aplicado es el siguiente:

1. Se genera el listado priorizado de proyectos.
2. Se toma el proyecto mejor valorado.
3. Se eliminan del listado los proyectos incompatibles con el proyecto de mayor prioridad en su misma línea.
4. Se toma el segundo proyecto mejor valorado en la nueva lista.
5. Se eliminan los proyectos incompatibles con el segundo proyecto de mayor prioridad en su misma línea.
6. Se repite el paso 3 y sucesivos hasta llegar al último proyecto de la lista, que no elimina ninguno.

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

Como se puede deducir de la matriz de incompatibilidad, la eliminación de proyectos no es igual en todas las líneas. El orden de aplicación del algoritmo de eliminación hace que desaparezcan diferentes proyectos en cada caso, sobre todo porque existen incompatibilidades no simétricas entre proyectos (A elimina a B, pero B no elimina a A).

Los tipos de proyectos eliminados en cada caso se presentan en la Tabla 5 37:

Código de proyecto	Conjunta	Orden	Línea
32300U	0.759275702390228	11	32300
32300V	0.759275702390228	12	32300
32300C	0.697368395640226	17	32300
32300B	0.658658519737891	19	32300
32300E	0.600720230940411	23	32300
31101T	0.531520901479002	30	31101
30851T	0.517351804457512	33	30851
30957U	0.507794361268123	39	30957
30957S	0.475946606715197	43	30957
32300J	0.474640332509964	45	32300
32150T	0.471379498931897	47	32150
33600U	0.420031464972158	54	33600
33600V	0.420031464972158	55	33600
33650U	0.416358490913939	57	33650
33650V	0.416358490913939	58	33650
33600S	0.415071768927462	60	33600
33650S	0.411427343628631	62	33650
31300G	0.408126043297667	63	31300
30800J	0.357648764062526	76	30800
31251J	0.34695507629477	80	31251
31101C	0.308912508667824	90	31101
30951J	0.277865587551573	111	30951
31101J	0.27414292270143	118	31101
33600C	0.249247153274919	133	33600
33650C	0.245202730971318	136	33650
32150C	0.245059773479651	137	32150
22400C	0.238546421811759	142	22400
30851J	0.224460355807945	155	30851
33801C	0.223528638856344	156	33801

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

30951C	0.221911985753872	158	30951
22400B	0.221803024474789	159	22400
30953J	0.218542816299211	166	30953
33650B	0.208284617441719	182	33650
30951B	0.207220372934691	185	30951
30950J	0.204374292825081	188	30950
33600E	0.203895895962256	190	33600
30957B	0.202880038221116	192	30957
30802J	0.188901375057237	206	30802
22400J	0.179998307906239	213	22400
30902J	0.178339590852848	219	30902
22450C	0.174846843633868	229	22450
30802E	0.174522784116428	230	30802
22500C	0.173875530678461	233	22500
30851C	0.173702536381549	234	30851
34200B	0.167799021221509	242	34200
30851B	0.163714937183063	252	30851
30802B	0.16348455263244	253	30802
22450B	0.163251676785141	254	22450
30953C	0.16143053701	258	30953
31100B	0.160623205534035	259	31100
30953B	0.152148556817663	268	30953
22500J	0.151893259978391	270	22500
31050C	0.138602967205483	290	31050
31050B	0.130013516149245	302	31050
30850J	0.128769703933005	304	30850
32150J	0.127838789730671	307	32150
34250J	0.125348821496831	311	34250
31251C	0.123770215049796	316	31251
22550C	0.11875989865275	322	22550
32350C	0.118042132601015	324	32350
31000C	0.111104088652759	332	31000
32350B	0.109698176378171	333	32350
34200J	0.106974606246965	335	34200
30850C	0.0865264702559393	353	30850
32350E	0.0853558922591979	355	32350
30850B	0.0803705772585155	358	30850
22550J	0.078995267269515	362	22550
22450J	0.078960476058825	364	22450

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

30902A	0.076296872498583	367	30902
30850G	0.064671151052115	378	30850
30900J	0.0546614252923729	384	30900
32500J	0.0472018339516978	389	32500
30850F	0.0460795308665906	390	30850
30900C	0.0442597193580118	392	30900
32500C	0.0429605820041189	395	32500
32500E	0.0428752262069113	396	32500
30900B	0.0414028350670362	398	30900
32500B	0.0406333942260463	400	32500
30900E	0.0367733854810375	403	30900

Tabla 5 37 Proyectos eliminados del listado general

Hacen un total de 79 proyectos eliminados.

El estudio de esta tabla nos muestra que desaparecen proyectos con valoraciones de todo tipo. No solo se eliminan proyectos de baja valoración sino que proyectos con valoraciones relativas muy altas desaparecen, algo esperable puesto que la valoración depende de la línea, así que eliminar proyectos con valoración alta pero inferior a la máxima es esperable al ser proyectos con resultados similares que se pueden sustituir entre sí.

De forma gráfica, podemos ver en la figura 5-14, la posición relativa de los proyectos eliminados por este filtrado (en negro).

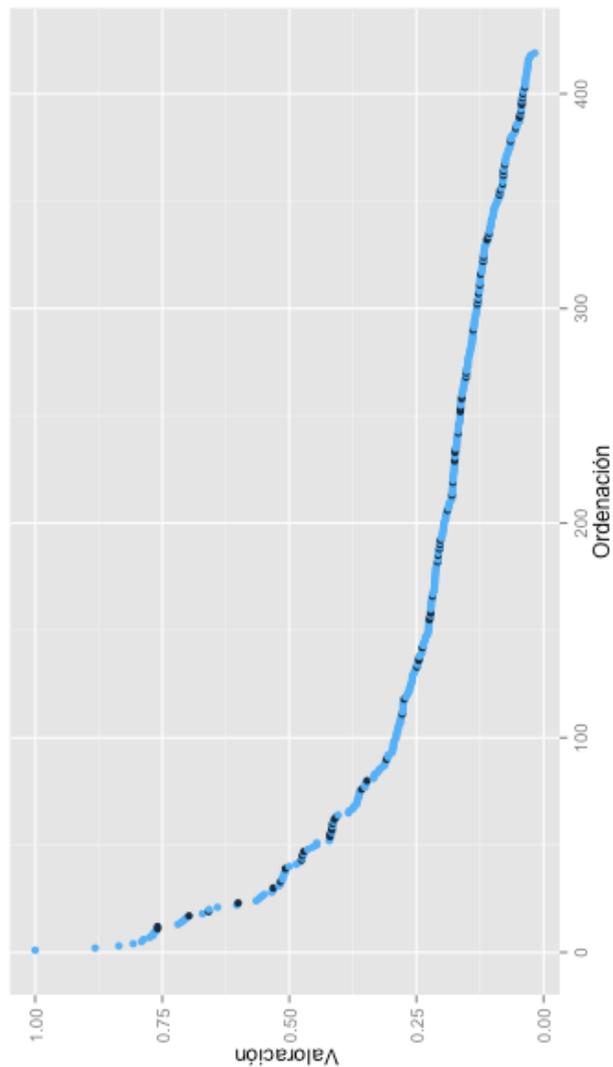


Figura 5 16 Alternativas ordenadas, las alternativas eliminadas en color negro

Estudiando las posiciones relativas de los proyectos eliminados por línea nos encontramos un resultado inicialmente sorprendente, ya que proyectos destacados, ver en la Figura 5 16, quedan eliminados, y dentro de los posibles proyectos por línea, los eliminados no suelen ocupar las últimas posiciones.

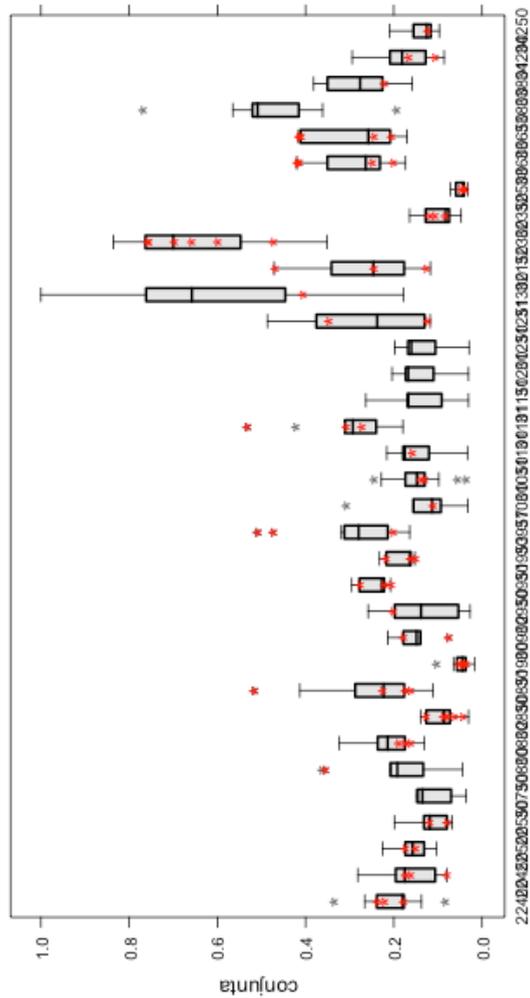


Figura 5 17 Valoración de los proyectos por líneas, la valoración de los proyectos eliminados en color rojo.

Para ilustrar los dos casos generales se puede ver en Figura 5 18 y Figura 5 19 la posición relativa de los proyectos eliminados en dos líneas, la línea 32300 y en la 31300, que nos muestran dos ejemplos de los comportamientos más característicos de las líneas. Un reparto de

proyectos eliminados en todo el rango o concentrado, por eliminarse alternativas con valoraciones muy parecidas entre sí.

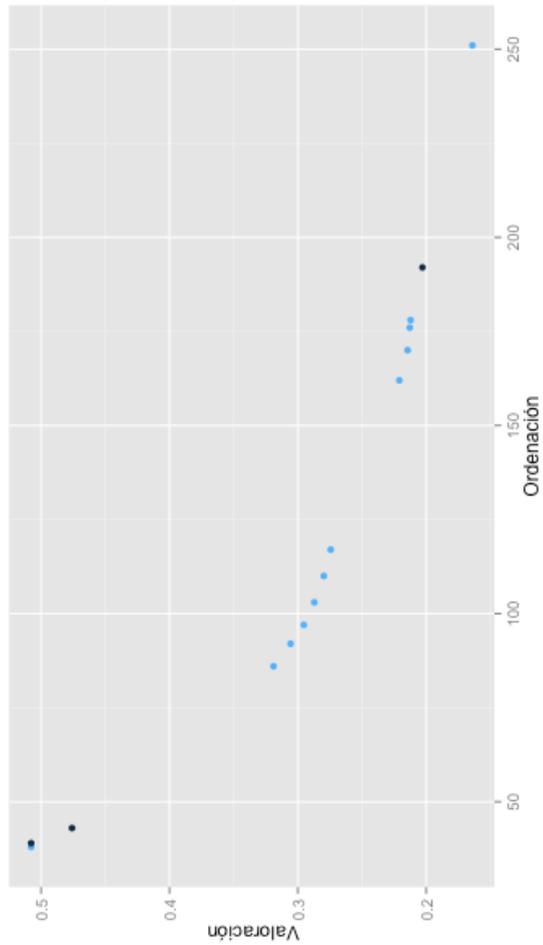


Figura 5 18 Valoración de los proyectos sobre la línea 32300, los proyectos eliminados en color negro

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

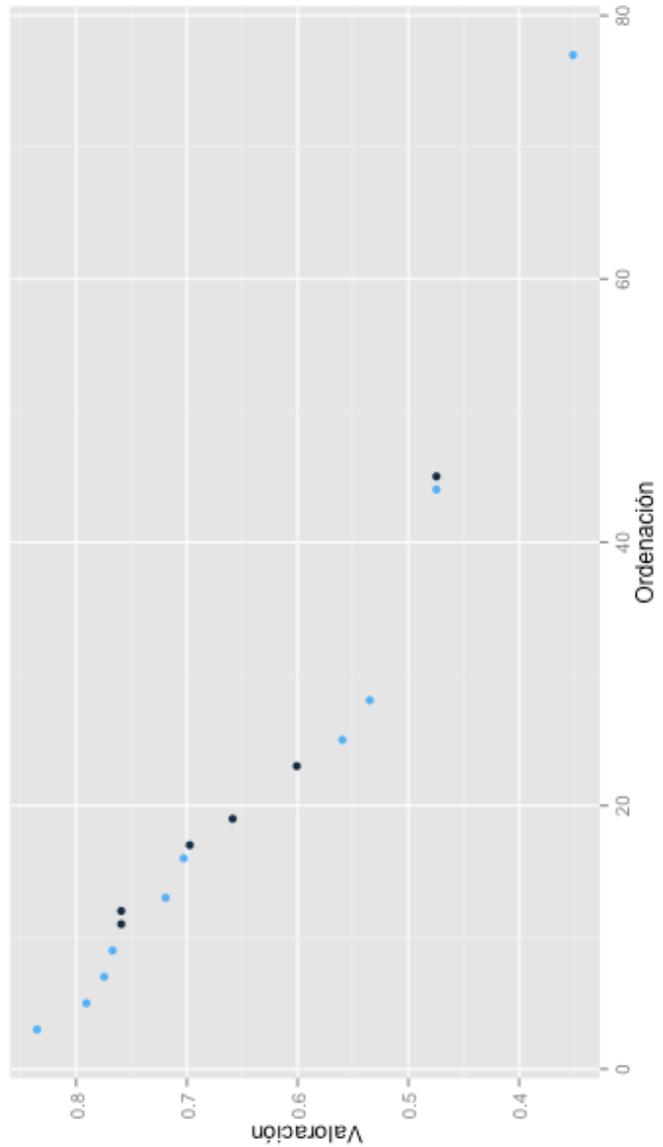


Figura 5 19 Valoración de los proyectos sobre la línea 31300, los proyectos eliminados en color negro

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

De forma similar al estudiar qué tipos de proyectos son eliminados más a menudo, en la figura 5-18 vemos que se eliminan principalmente los proyectos tipo B, C, J y en menor medida S, T, U y V. Este resultado es lógico, teniendo en cuenta que son algunos de los tipos de proyecto más relacionados con otros. Las posiciones relativas dentro del tipo de proyectos son muy variadas, encontrándose proyectos descartados con todo tipo de valoraciones dentro del rango.

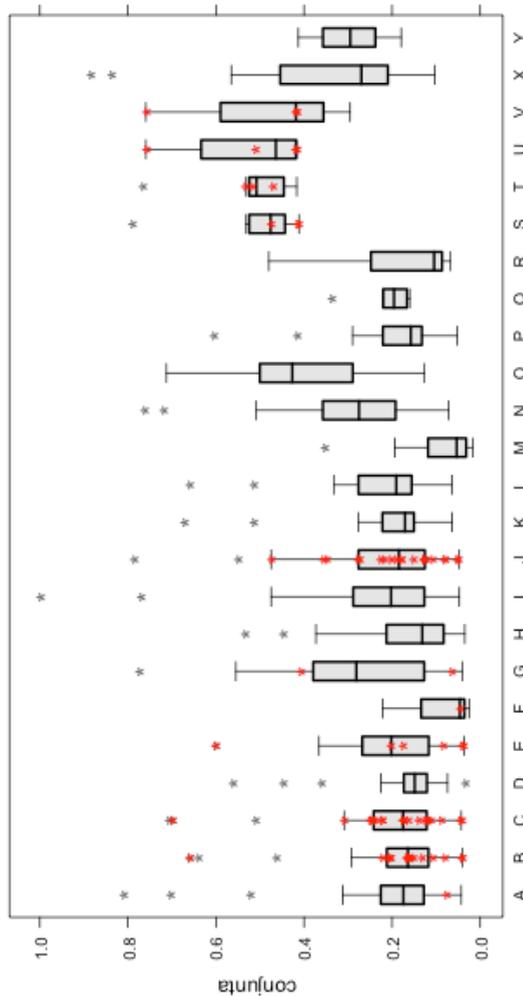


Figura 5 20 Valoración por tipo de proyecto, las valoraciones de los proyectos eliminados en color rojo. Elaboración propia.

Llamativamente los proyectos tipo A, F y G han permanecido de forma preferente, pese a estar también muy relacionados con los demás. Este hecho nos marca que son proyectos con mejor valoración relativa que sus alternativas y suelen ser preferidos en muchas líneas.

Esta figura nos muestra que, pese a que las preferencias entre proyectos son fuertes, no son absolutas, no podemos descartar una familia de proyectos a priori porque hay casos en los que tiene mejor valoración que sus alternativas.

Con este análisis conjunto de la cartera de proyectos podemos obtener un imagen de conjunto de qué proyectos son más necesarios o útiles en la zona de estudio y permitir centrar los recursos en el tipo de actuaciones más efectivo para cada zona ya que, como se ha visto es necesario un estudio profundo para obtener los proyectos adecuados al no existir una norma general aplicable.

5.7. Análisis de Sensibilidad AHP.

Para poder estudiar la robustez de los resultados obtenidos y ver hasta qué punto es estable el resultado y si las variaciones de los pesos afectan mucho a la ordenación obtenida se ha realizar un análisis de sensibilidad. El proceso consiste en cambiar la prioridad de un criterio manteniendo las proporciones de las prioridades de los otros criterios, de tal manera que todos ellos al modificarse, incluso el criterio alterado, sumen uno, (Saaty, 1997).

De esta forma, se refleja como los cambios en la prioridad de los criterios cambian la ordenación de las alternativas. Para que resulte más sencillo y eficiente solo se han considerado el grupo reducido de alternativas que se están usando para esta parte del análisis. El listado está definido en el anexo 4.

5.7.1. Análisis de sensibilidad de los criterios.

En la primera parte de este análisis de sensibilidad vamos a ver cómo cambia la valoración de las alternativas frente a cambios en los pesos de los criterios, se van a representar los gráficos de los criterios de más peso, oscilando de 0 a 0,5 con respecto al objetivo, tanto para criterios con alta valoración inicial como para criterios poco valorados.

CSC.C1 Criterio Reducción de pasos a nivel.

Al representar como cambian las valoraciones de las alternativas seleccionadas al cambiar el peso de este criterio obtenemos la Figura 5 21.

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

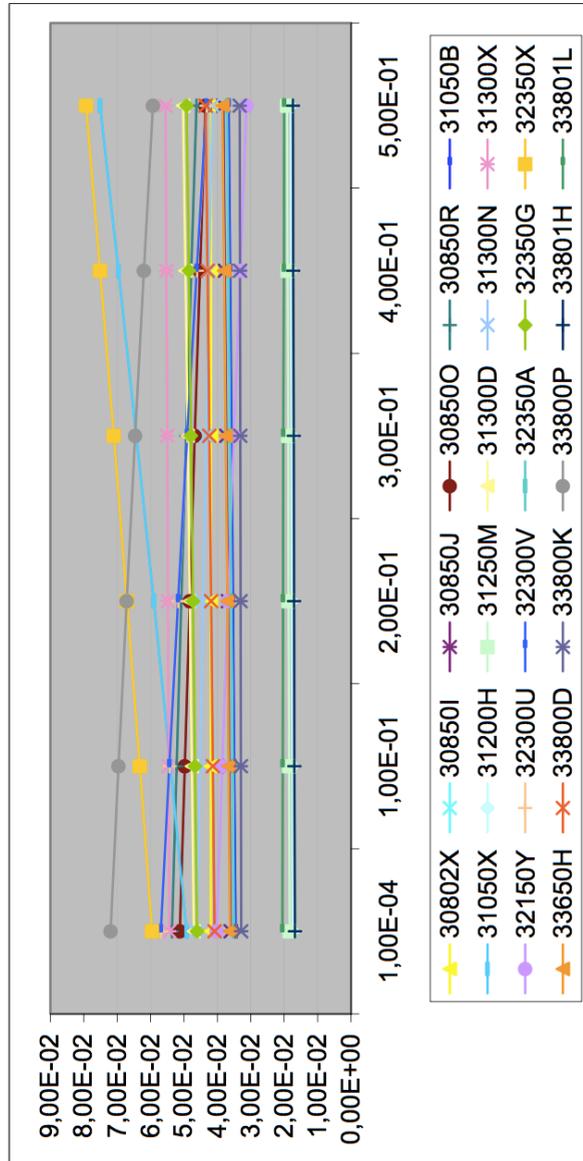


Figura 5 21 Análisis de sensibilidad del criterio CSC.C1 Reducción de pasos a nivel.

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

Donde se puede ver que las actuaciones no prioritarias siguen manteniéndose en las posiciones menos prioritarias en toda la zona de variabilidad estudiada y dentro del grupo de actuaciones más importante se producen cambios en la ordenación, aunque no muy grandes.

CSC.C2 Criterio Mejora señalización de Pasos a nivel.

En este caso estamos hablando de un criterio de baja importancia en un cluster de importancia alta, al variar el peso del criterio obtenemos lo siguiente. Reflejado en la Figura 5 22.

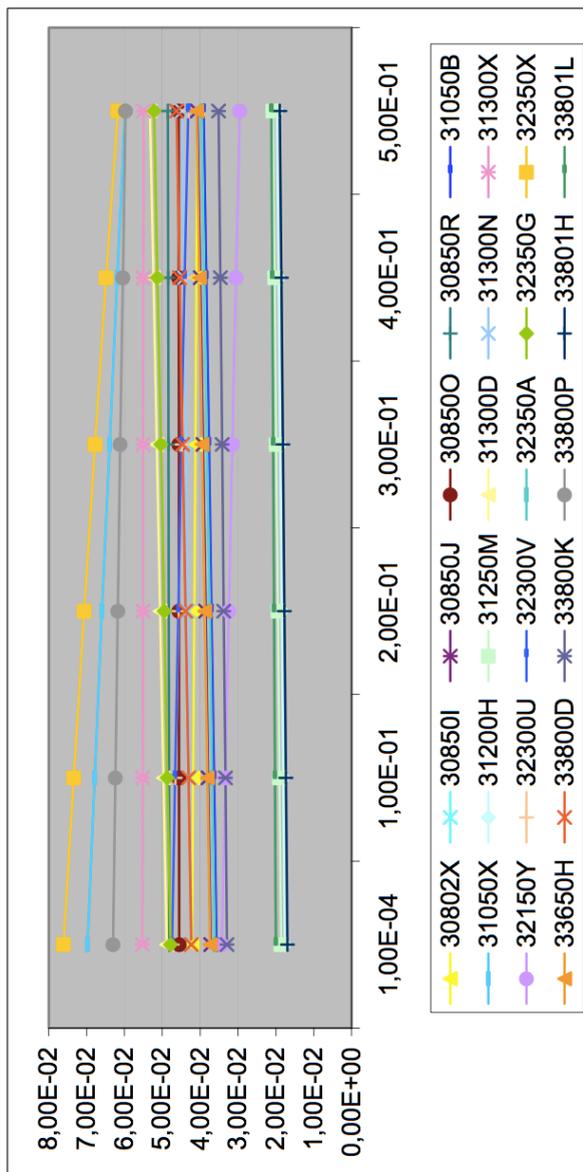


Figura 5 22 Análisis de sensibilidad del criterio CSC.C2 Señalización de pasos a nivel.

Aunque la prioridad total de las alternativas cambia, apenas se producen

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

cambios en la ordenación y si ocurren son reducidos y en alternativas poco importantes, por lo que podemos decir con bastante seguridad que este criterio apenas afecta a la ordenación de las alternativas en la cartera de proyectos.

CSC.C3 Criterio Mejora sistemas de ayuda a la conducción.

De forma similar a los anteriores vemos como varían las prioridades de las alternativas con el peso del criterio. Reflejado en la Figura 5 23.

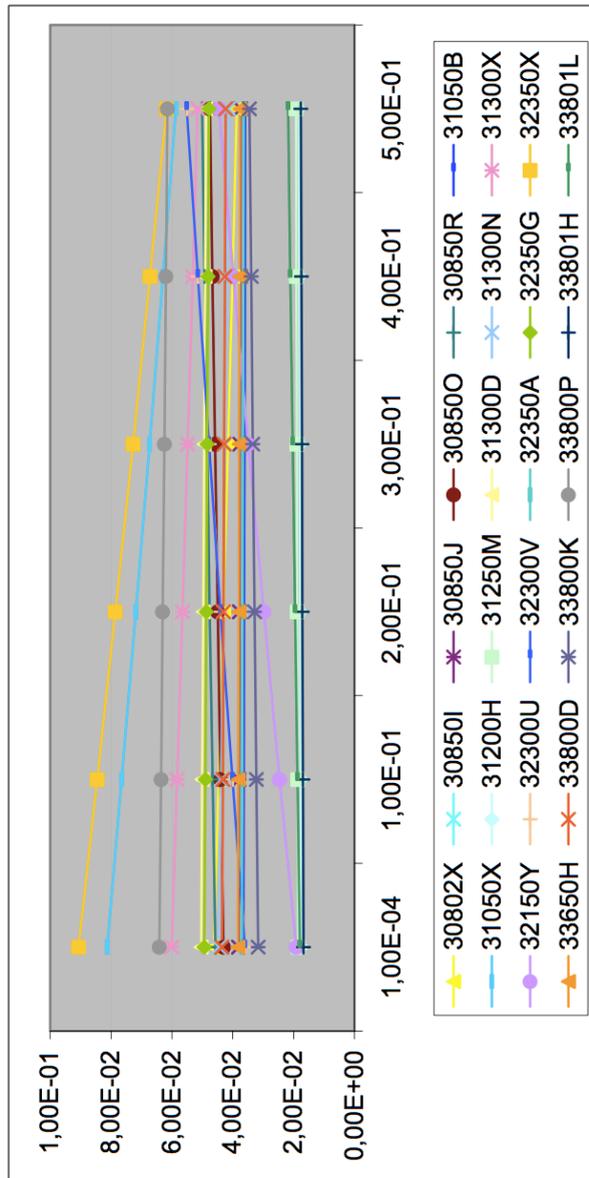


Figura 5 23 Análisis de sensibilidad del criterio CSC.C3. Mejora sistemas de ayuda a la conducción

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

Como podemos ver existen cambios pero son reducidos, excepto en el caso de las alternativas 31050B y 32150Y que escalan muchas posiciones en el caso de elevado peso de este criterio, debido principalmente al bajo peso de los criterios que se ven disminuidos al aumentar el peso del criterio estudiado, mejorando su posición relativa.

CSE.C6 Criterio Reducción del cantón crítico:

Este criterio tiene una importancia media, quedando las prioridades al evaluarlo reflejadas en la Figura 5 **24**

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

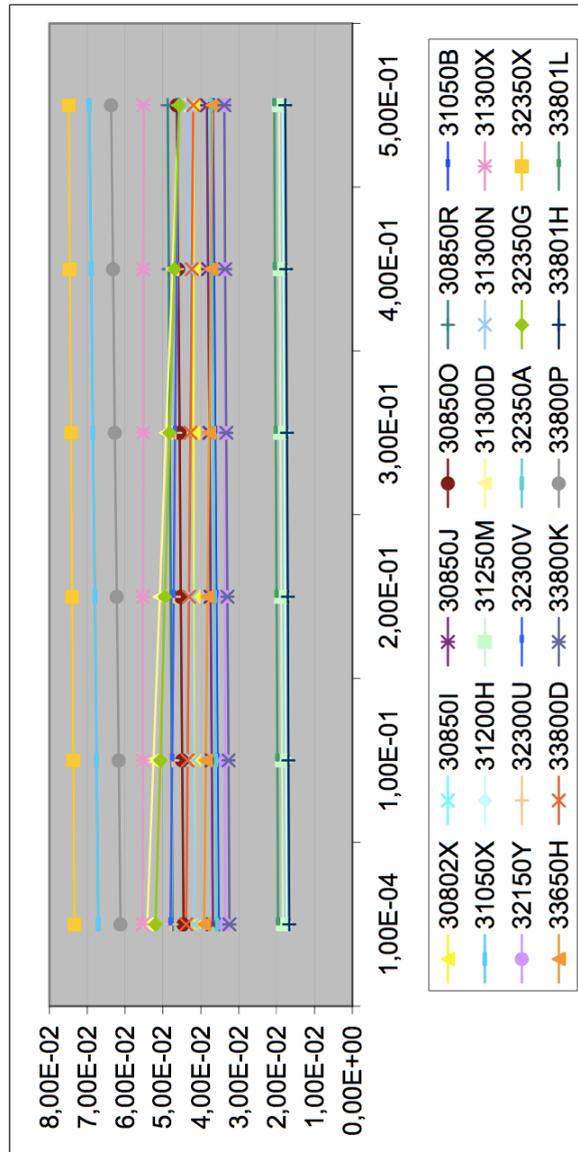


Figura 5 24 Análisis de sensibilidad del criterio CSE.C6 Reducción del cantón crítico.

Excepto 32350G, muy vinculada al criterio reducción de tiempos de viaje que pierde mucha importancia relativa al priorizarse la reducción del

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

cantón crítico vemos que los pesos obtenidos son bastante robustos para este criterio, no produciéndose cambios grandes en la ordenación de las alternativas al variar el peso de los criterios.

CUS.C26 Criterio Mejora comunicación entre municipios.

Este criterio pertenece a un cluster poco importante, pero permite evaluar la importancia relativa que puede llegar a alcanzar un elemento de ese cluster. La Figura 5 25 refleja el estudio realizado.

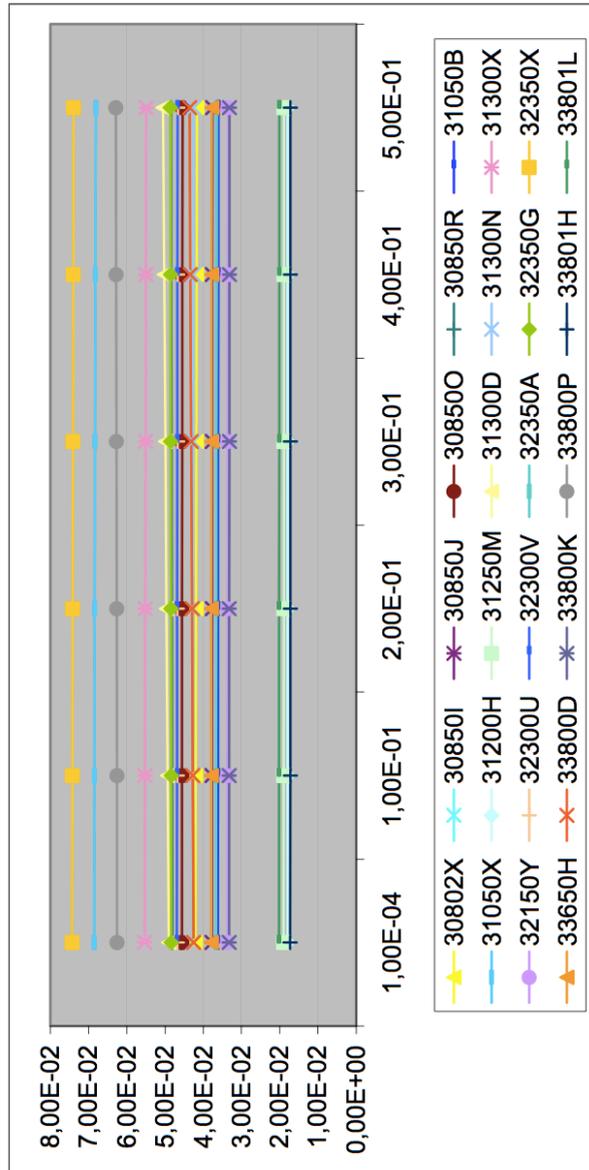


Figura 5 25 Análisis del criterio CUS.C26 Mejora comunicación entre municipios.

Con lo que queda claro que criterios de poco peso como este no afectan

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

apenas a la ordenación, siendo marginales incluso en los casos más extremos.

CSC.C4 Criterio Automatización de itinerarios y bloqueos.

Otro de los criterios fundamentales, gráficamente podemos ver su variación en la Figura 5 26.

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

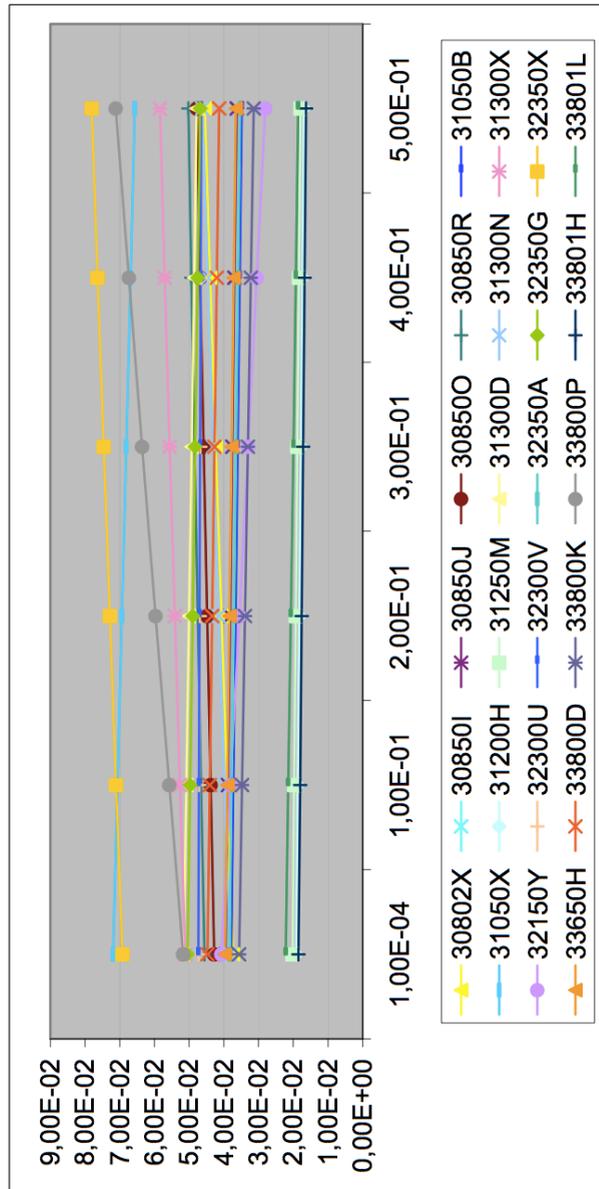


Figura 5 26 Análisis de sensibilidad del criterio CSC.C4 Automatización de itinerarios y bloqueos.

En este criterio se produce una inversión de orden entre las primeras alternativas, debida a que la valoración de cada una de ellas está fuertemente relacionada con un criterio diferente del cluster de seguridad en la circulación, aunque en el entorno de la prioridad obtenida (0,27) el orden se mantiene en un margen muy amplio, siendo además la diferencia de prioridad reducida. Las actuaciones cuya valoración depende de una muy buena valoración en un solo criterio son las más sensibles a los cambios en los pesos de esos criterios, pero ese tipo de actuaciones no son los que tienen una mayor valoración en general y son las que ocupan los últimos puestos en la ordenación obtenida.

5.7.2. Conclusiones del análisis de sensibilidad de la jerarquía AHP.

Con el estudio realizado se puede afirmar que los resultados obtenidos son robustos dentro de un amplio margen de variaciones de los pesos, configurándose una cartera de alternativas estable que no se ve afectada significativamente por cambios menores en los pesos de los criterios. Algunas alternativas se ven afectadas cuando su valoración depende mucho de un buen resultado en un criterio determinado, pero suelen tener valoraciones medias dentro del conjunto y requieren de un gran cambio de peso para que su posición en la ordenación obtenida se vea muy alterada.

5.8. Análisis de sensibilidad ANP-BC

	Beneficios	Costes
30802X	0,0411	0,0399
30850I	0,0223	0,03
30850J	0,0223	0,03
30850O	0,039	0,0322
30850R	0,0451	0,0365
31050B	0,0222	0,0322
31050X	0,0514	0,03
31200H	0,0222	0,0518

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

31250M	0,0222	0,0406
31300D	0,0536	0,0214
31300N	0,0336	0,0322
31300X	0,0502	0,03
32150Y	0,0503	0,0814
32300U	0,0639	0,0639
32300V	0,0639	0,0663
32350A	0,0232	0,0115
32350G	0,0498	0,0093
32350X	0,0609	0,03
33650H	0,066	0,0771
33800D	0,0352	0,0396
33800K	0,0264	0,0343
33800P	0,0867	0,0218
33801H	0,0222	0,0771
33801L	0,0264	0,0814

Tabla 5 38 Valoración de las alternativas en cada Subred

5.8.1. Análisis de sensibilidad de las subredes.

Si variamos el peso de cada subred obtenemos lo siguiente.

Subred de Beneficios

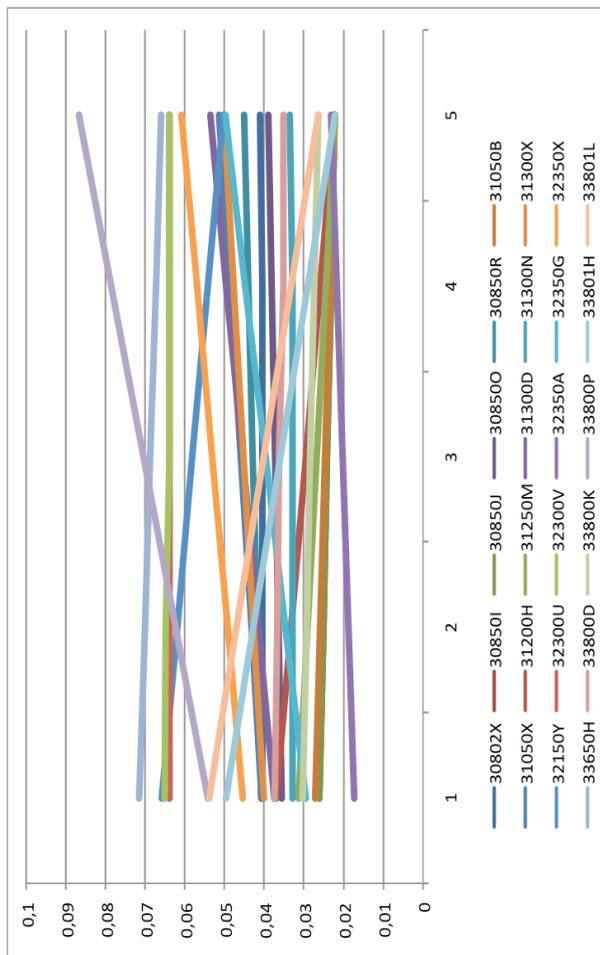


Figura 5 27 Análisis de sensibilidad de la Subred de Beneficios en ANP-BC

Subred de Costes

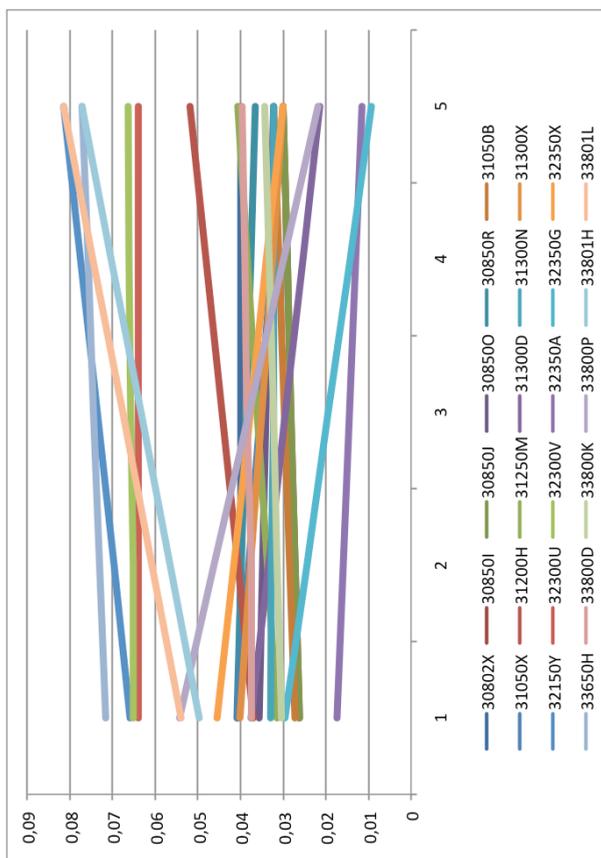


Figura 5 28 Análisis de sensibilidad de la subred de costes en ANP-BC

5.8.2. Conclusiones del análisis de sensibilidad de la red ANP-BC.

Al haber solo dos subredes, los resultados obtenidos del análisis de valoración son simétricos. Se puede apreciar que en general casi todas las actuaciones son estables excepto cuatro de ellas.

Principalmente la actuación 33800P y la 30802X se cambian las posiciones relativas y la 33801H y la 33801L aumentan al aumentar los beneficios. Dado que la actuación 30802X es la supresión de pasos a nivel en la línea 30802, De Bifurcación Vallada a Bifurcación Alcudia, una línea con tráfico de cercanías y presencia de pocos pasos a nivel y la 33800P es la construcción de un puesto de bloqueo y la reducción del cantón crítico en la línea 33800 Silla-Gandia se debe al cambio del peso relativo entre los criterios de reducción de pasos a nivel y los de ganancia de capacidad.

La red ANP-BC es menos robusta que la jerarquía AHP y por tanto los resultados dependen más de cómo se ponderen los criterios. Aun así, dentro de los rangos más probables el comportamiento es aceptable.

Al haberse concentrado gran parte de la prioridad en menos criterios las diferentes valoraciones de cada actuación con respecto a los criterios que ahora concentran toda la importancia hace que la variación sea mayor y en general menos estable.

5.9. Análisis de sensibilidad ANP-BOCR

5.9.1. Análisis de sensibilidad de las subredes.

Las valoraciones obtenidas para cada subred ANP-BOCR de la muestra de actuaciones se pueden ver en la Tabla 5 39.

Actuaciones	Beneficios	Costes	Oportunidades	Riesgos
30802X	0,0251	0,033	0,046	0,0268
30850I	0,0304	0,0345	0,0421	0,028
30850J	0,0304	0,0345	0,0421	0,028
30850O	0,04	0,0353	0,0473	0,028
30850R	0,0431	0,0421	0,0392	0,0296
31050B	0,0253	0,0481	0,049	0,0349
31050X	0,0322	0,0489	0,0546	0,0349

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

31200H	0,014	0,0281	0,023	0,0182
31250M	0,0173	0,039	0,0246	0,0225
31300D	0,024	0,0484	0,0302	0,0374
31300N	0,0249	0,0414	0,0345	0,0268
31300X	0,026	0,033	0,0498	0,0268
32150Y	0,0604	0,0452	0,0489	0,0831
32300U	0,0911	0,0521	0,0559	0,0952
32300V	0,0911	0,0612	0,0559	0,0952
32350A	0,0542	0,0379	0,032	0,0466
32350G	0,0586	0,0315	0,0343	0,038
32350X	0,0635	0,03	0,0426	0,038
33650H	0,0776	0,0503	0,0573	0,0853
33800D	0,0382	0,0656	0,0513	0,0322
33800K	0,038	0,0471	0,0509	0,032
33800P	0,0594	0,0573	0,0483	0,0406
33801H	0,0163	0,0278	0,0188	0,0362
33801L	0,0188	0,0278	0,0214	0,0355

Tabla 5 39 Valoración de las alternativas según cada subred en ANP-BOCR

Si variamos el peso de cada subred entre 0,1 y 0,5, obtenemos los siguientes resultados.

Subred de Beneficios

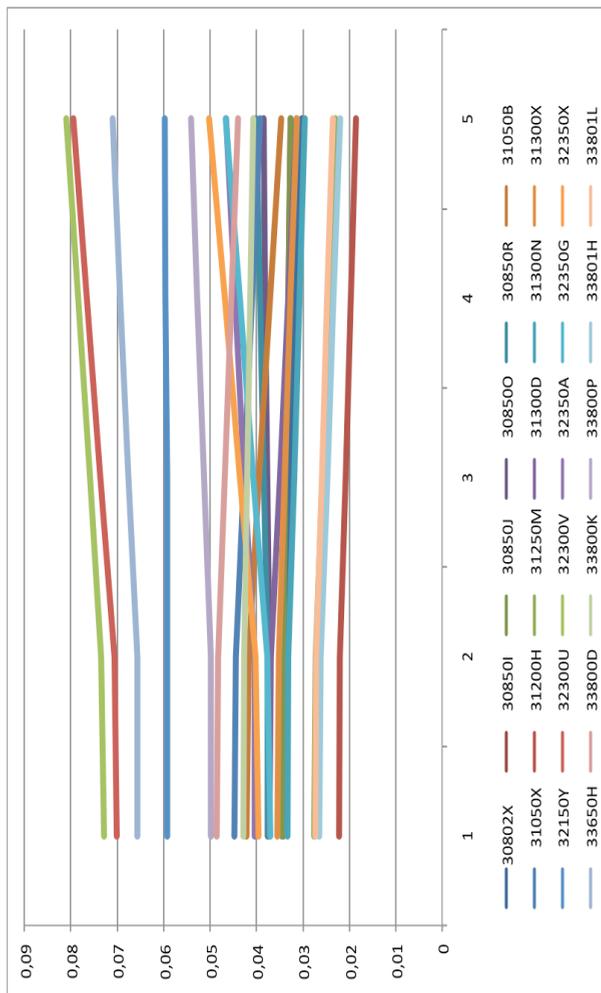


Figura 5 29 Análisis de sensibilidad de la subred de Beneficios ANP-BOCR

Subred de Oportunidades

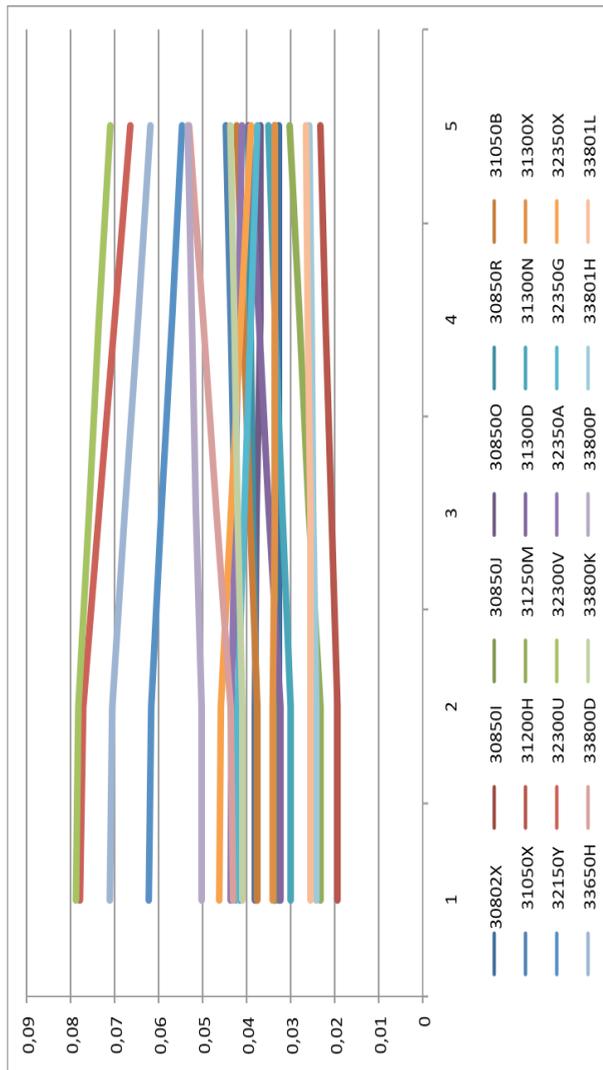


Figura 5 30 Análisis de sensibilidad de la subred de Oportunidades ANP-BOCR

Subred de Costes

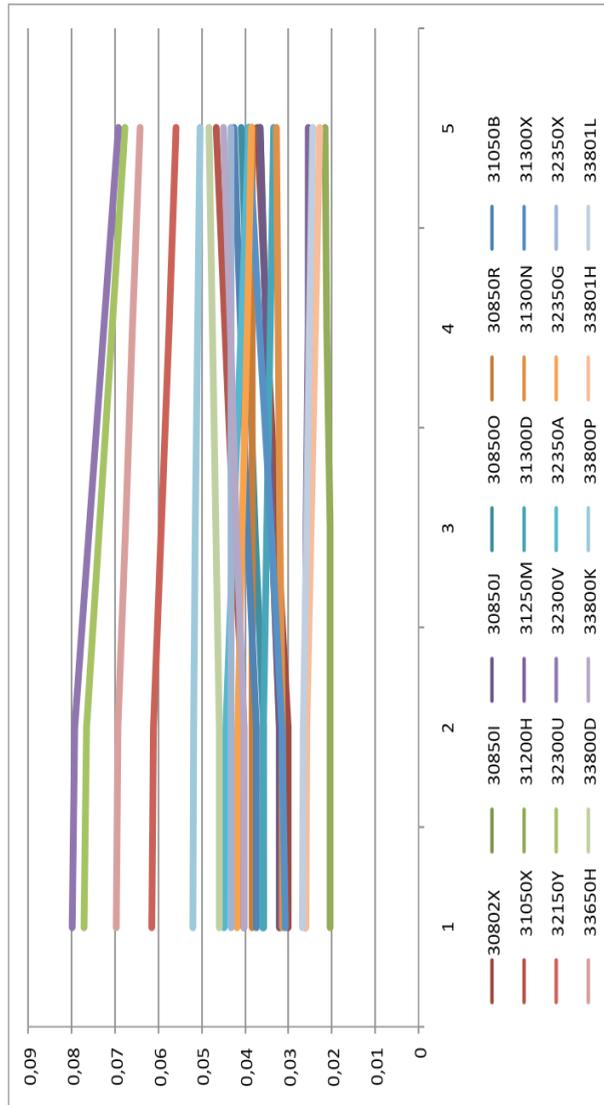


Figura 5 31 Análisis de sensibilidad de la subred de Costes ANP-BOCR

Subred de Riesgos

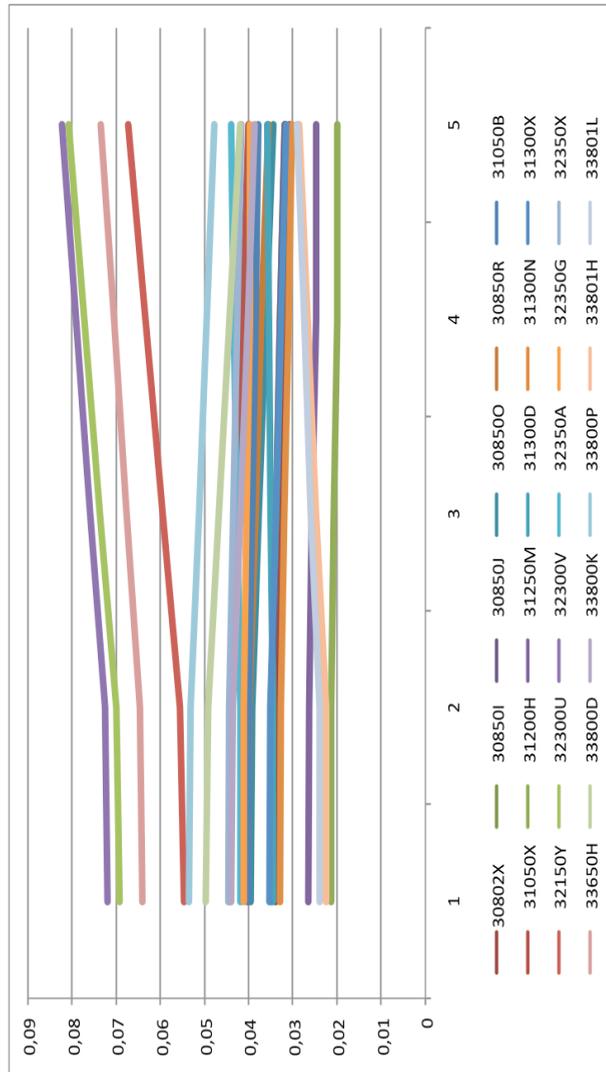


Figura 5 32 Análisis de sensibilidad de la subred de Riesgos ANP-BOCR

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

5.9.2. Conclusiones del análisis de sensibilidad de la red ANP-BOCR.

El modelo ANP-BOCR es más robusto que los anteriores. No hay apenas cambios en la ordenación y no se producen alteraciones muy grandes en las valoraciones de las actuaciones. En las actuaciones de mayor valoración el orden se mantiene dentro de todo el margen y solo hay cambios en la ordenación en proyectos con valoraciones muy bajas, que son marginales.

Capítulo 6

Conclusiones, aportaciones y líneas de trabajo futuras.

6.1. Conclusiones sobre el análisis multicriterio aplicado a carteras de proyectos de mantenimiento.

En los departamentos de mantenimiento, tanto en el sector de infraestructuras ferroviarias, como en cualquier otro sector de infraestructuras de red, siempre hay una gran cartera de posibles proyectos, basados en la experiencia de uso de las instalaciones existentes y en las limitaciones conocidas de estas. Los métodos convencionales de evaluación de proyectos no tienen demasiada precisión y están muy sujetos a sesgos, siendo claramente necesario el desarrollo de nuevos métodos de evaluación (Flyvbjerg, 2007a) .

El caso descrito en esta tesis demuestra que es posible utilizar técnicas de ayuda a la decisión multicriterio discreta de forma eficaz para analizar la cartera de proyectos al completo y mejorar la evaluación de los proyectos entre sí en un tiempo razonable. De este modo se ha satisfecho el objetivo específico de “proponer un método sistemático para identificar los proyectos de MR&I de una determinada infraestructura ferroviaria”

En el caso específico estudiado, la problemática fundamental es la cantidad de proyectos posibles, al existir múltiples niveles de calidad de servicio que se pueden obtener en cada uno de los tramos que componen la red objeto de estudio. Otro efecto importante que ha habido que considerar es que cada uno de los tramos no es completamente independiente sino que depende del tipo de tramo en relación con el resto de la red, principalmente la red cercana. Este efecto ha obligado a tener en cuenta las características específicas de cada tramo, sin poder generalizar.

Para conocer con precisión el efecto esperado del proyecto sobre la red, es necesario un análisis muy completo de éste, con un coste económico y de tiempo muy alto, sin conseguir una precisión muy elevada y seguir sujeto a las incertidumbres propias de un proyecto estructuralmente complejo, (Koppenjan et al., 2011). El uso de los modelos analizados, especialmente el modelo ANP-BOCR aplicado a toda la cartera permite que, con un nivel de información mucho más bajo, se haya podido determinar qué proyectos son más prioritarios, teniendo en cuenta todos los criterios que se han analizado en este trabajo

La cartera de proyectos, una vez analizada de esta forma, ha dejado de ser una lista de proyectos independientes y se ha convertido en una lista priorizada. Además, gracias al método utilizado, se conoce la razón por la que determinados proyectos tienen más prioridad, a juicio de los técnicos que han participado en el proceso de priorización. Aunque el objetivo del análisis de la cartera es ayudar a la decisión de ejecución de proyectos el poder descubrir qué factores hacen que determinados proyectos sean más interesantes es muy útil. Permite por ejemplo, ayudar a conocer los factores que deberían mejorar en los proyectos no prioritarios para hacerlos más interesantes, tanto desde el punto de vista del mantenedor como para los departamentos de Investigación y Desarrollo, e incluso para los proveedores, que con la información disponible en la valoración pueden analizar cuáles son los puntos débiles de su oferta, propiciando una evolución tecnológica enfocada a la mejora en el desempeño de los criterios del análisis realizado.

Un ejemplo de las conclusiones que se extraen del análisis de la cartera de proyectos disponible actualmente es que, para líneas con tráfico medio o bajo, es necesario utilizar tecnologías de señalización con bajo número de elementos en vía para que el coste de mantenimiento sea reducido, pudiendo optimizar el tráfico de forma segura simultáneamente.

La cartera analizada incluye proyectos con tecnologías y con repercusiones muy diferentes sobre el tráfico ferroviario, siendo muy pocas las personas que tengan un conocimiento alto sobre todas ellas a la vez.

Los resultados del análisis permiten al decisor, que no tiene por qué ser experto en ninguna de ellas en particular, disponer de una información sobre la prioridad de cada proyecto de forma conjunta y con la seguridad de disponer de toda la información que se haya considerado relevante. Cualquier técnica de análisis que permita descomponer un proyecto en una serie de atributos básicos y analizarlos de forma independiente consigue este objetivo. Esto no implica que no sean necesarios expertos adicionales para realizar la priorización final, pero sí que crea un marco de referencia para realizar el análisis mucho más definido que sin las técnicas de ayuda estaría más disperso.

6.2. Conclusiones sobre la selección de criterios aplicados en análisis multicriterio de mantenimiento ferroviario.

Una parte fundamental del resultado de este trabajo ha sido la selección realizada de criterios. Aunque en la literatura sobre proyectos ferroviarios existen muchos ejemplos de criterios aplicados, (Asensio, 2000; Debrezion, Pels, & Rietveld, 2009; Ieda et al., 2001; Schwanen & Dijst, 2002), para el caso de proyectos de mantenimiento, es decir, proyectos de mejora del nivel de servicio de instalaciones existentes sólo desde el punto de vista de infraestructura, no son tantos, (Johansson & Nilsson, 2004; Thomas et al., 2005), y están centrados en carteras de proyectos más reducidas y genéricas.

Los grupos de criterios obtenidos permiten caracterizar, por un lado la infraestructura sobre la que se realiza la actuación, no de forma absoluta, algo realmente difícil, pero sí de forma comparada, con una escala

vinculada al estado real de la infraestructura existente en la zona de estudio. El uso de escalas de comparación, sin función de utilidad explícita está en la base de los métodos AHP y ANP y es una de sus principales ventajas, sobre todo en casos como estos, donde es complejo evidenciar las funciones de utilidad subyacentes (si es que realmente existen) (Saaty, 2008b), es decir, resulta muy difícil medir las preferencias del decisor.

Los criterios basados en los proyectos específicos están también presentes, pero casi todos se basan, no en las características intrínsecas del proyecto, sino en su efecto sobre la infraestructura y/o el funcionamiento de la red que es el objetivo final de cualquier actuación.

Los criterios no se han definido desde un punto de vista de infraestructura, en el que se busca una mejora de las características técnicas de las instalaciones como un fin en sí mismo, lo que no es realmente útil (Koppenjan et al., 2011), sino que se han definido considerando un punto de vista de gestión del transporte, intentando mostrar los cambios conseguidos en la calidad de servicio hacia los usuarios ya existente. Los estudios de (de Rus & Inglada, 1997) muestran que gran parte de los nuevos viajeros generados por cambios en las infraestructuras ferroviarias, se deben al aumento de uso por parte de usuarios actuales, más que a la inducción de nuevos usuarios.

Los criterios, al ser definidos de este modo, no están vinculados a la tecnología actual, ni a los condicionantes específicos de la explotación del tramo estudiado en el caso de estudio, parte de la Red Convencional de ADIF. Por tanto, los criterios que se han identificado en esta tesis pueden resultar útiles para estudiar cualquier red ferroviaria, ya sea de metro, tranvía o alta velocidad.

Los pesos obtenidos sí que habrán de ser recalculados para otras redes y otros momentos temporales, para integrar la particularidad de cada red estudiada y los cambios en las condiciones de explotación generados por los proyectos ejecutados, así como cualquier otro cambio externo que afecte a las condiciones a considerar en el diseño.

La selección de criterios realizada está enfocada al análisis desde un gestor de infraestructura puro, incluyendo proyectos de diversas técnicas, con total responsabilidad sobre ellos pero sin responsabilidades sobre la gestión de la flota ni el diseño de la cartera de servicios. En la literatura no se ha podido localizar ningún trabajo con este enfoque metodológico. En base a las directrices de la Directiva 91/440 de la U.E. y desarrollos posteriores, de liberalización del sector ferroviario en Europa el enfoque adoptado en este trabajo se vuelve más común, al estar desagregándose

las funciones de gestión de la infraestructura de la gestión de la operación del transporte ferroviario.

6.3. Conclusiones sobre el ANP-BC con categorías en análisis multicriterio de mantenimiento ferroviario.

Las conclusiones descritas en los dos apartados anteriores son comunes a los tres modelos desarrollados en el caso de estudio.

En este caso de estudio, por el número de alternativas existentes, ha sido necesario utilizar la técnica de Ratings para evaluar las alternativas respecto a cada uno de los criterios. El uso de esta técnica se ha demostrado útil, ya que ha permitido evaluar cada proyecto, independientemente de los demás. Los expertos han debatido sobre el establecimiento, para cada criterio de las categorías y su ponderación. Después, la asignación a cada proyecto de las respectivas categorías, para cada criterio, se ha realizado con relativa facilidad, dado que los técnicos que hicieron la evaluación conocían muy bien, por su experiencia, cada tipo de proyecto.

El uso de categorías ha permitido que un problema en principio inabarcable directamente usando el método AHP o ANP, por tener que realizar comparaciones directas entre todas las alternativas entre sí frente a todos los criterios, se vuelva asumible. El uso de Ratings permite evaluar un gran número de alternativas. En el entorno de evaluación en el que se ha trabajado el uso de categorías es adecuado, ya que las alternativas irrelevantes no influyen en la ordenación del resto y se pueden eliminar del conjunto de decisión sin alterar la ordenación del resto del conjunto.

El uso de ANP (proceso analítico en red) ha permitido capturar todo tipo de relaciones entre los criterios, no solo de dependencia jerárquica como en el AHP. El uso del modelo jerárquico para asignar pesos a los criterios refleja la importancia que los decisores dan a los mismos, sin tener en cuenta las influencias en preferencia que puede haber entre unos y otros. El modelo ANP ha permitido asignar esa importancia teniendo en cuenta las influencias percibidas por los decisores. Esto ha permitido comprobar cómo determinados criterios han perdido importancia al pasar al modelo en red y ésta se ha concentrado en los criterios realmente críticos, principalmente lo que marcan el desempeño del sistema después de la

ejecución del proyecto. Los decisores están convencidos que este modelo refleja mejor sus preferencias.

Todo ello ha permitido realizar una profunda reflexión sobre qué criterios hay que considerar y su importancia. De este modo se ha satisfecho el segundo objetivo específico planteado en esta tesis.

6.4. Conclusiones sobre el ANP-BOCR en análisis multicriterio de mantenimiento ferroviario.

Durante el proceso de realización de esta tesis, pese a la potencia intrínseca como método de ayuda a la decisión multicriterio del AHP y del ANP-BC con categorías, se observó que estos dos modelos no capturaban toda la información disponible de una manera adecuada, en opinión de este autor. Por ello se decidió aplicar una evolución del ANP, el ANP con Beneficios, Oportunidades, Costes y Riesgos, que se compone de una jerarquía con cuatro subredes ANP, esta es la versión más madura del ANP y recomendada en (Saaty, 2005) para problemas especialmente complejos como es este caso.

El ANP-BOCR permite desarrollar varios tipos de relaciones en cada una de las subredes y captura todas las relaciones posibles. En el caso de estudio desarrollado permite integrar de forma eficaz criterios cuantitativos y cualitativos con información de poca calidad y de fuentes diversas. Al separar cada uno de los efectos en redes separadas se pueden considerar puntos de vista que pueden ser considerados, por ejemplo un riesgo y a la vez una oportunidad. También se puede capturar las relaciones entre los criterios de forma diferenciada según el efecto que se esté estudiando en cada subred.

En este trabajo no se ha realizado ninguna innovación formal en el uso del ANP-BOCR estudiándose un problema complejo y con un número elevado de alternativas.

El método ANP-BOCR es adecuado para el estudio de cartera de proyectos realizado y permite incluir todos los criterios y relaciones que, según el decisor, son necesarios para capturar la problemática subyacente en el problema presentado.

6.5. Resultados obtenidos de una cartera de proyectos reales.

En esta tesis se ha trabajado con una cartera real de 419 proyectos, que incluían todos los proyectos posibles técnicamente sobre la infraestructura responsabilidad del decisor. No es habitual el considerar una cartera de proyectos tan amplia en los problemas de decisión multicriterio, pero el uso de categorías nos permite trabajar con esta cartera de forma eficaz.

Los proyectos considerados son todos los habituales posibles sobre todos los tramos de la red. Evidentemente, en un proceso de decisión clásico (sin aplicar un modelo multicriterio como el propuesto en esta tesis) no se consideran todos los proyectos de manera explícita, teniéndose en cuenta solo 5-10 (regla de 5 ± 2) proyectos, basados en los resultados de las acciones de mantenimiento preventivo y correctivo. El tipo de proyectos considerados habitualmente suelen estar relacionados con parámetros cuantificables del estado de la infraestructura, los cuales, una vez superado un umbral, activan la necesidad de la actuación. También suelen estar relacionados con actuaciones sobre las instalaciones que generan muchas incidencias o un impacto alto sobre la productividad del sistema (retrasos o reducciones de capacidad importantes).

Por la experiencia del autor de este trabajo, esta técnica habitual (que denominamos clásica) de selección de proyectos da, en general, resultados aceptables, ya que los proyectos realizados están enfocados a resolver problemas concretos, pero no es plenamente satisfactoria para los decisores, ya que, al no haber una evaluación amplia no podemos saber si estamos actuando sobre los puntos realmente más importantes o sólo sobre los que tenemos la mayor percepción subjetiva de importancia. El problema de este sistema de selección de proyectos se presenta cuando, actuaciones que deberían ejecutarse con cierta prioridad no se ejecutan en el momento adecuado, aunque existan señales de la necesidad, situándose en primera línea de la cartera cuando se genera una situación grave de malfuncionamiento o criticidad. Este enfoque de la gestión de la cartera de proyectos es lo que (Kester et al., 2009) denomina una gestión intuitiva de la cartera de proyectos, con los problemas de falta de concentración y una alta implicación emocional de los gestores con los proyectos, generando habitualmente sobrecarga de proyectos, proyectos huérfanos y retrasos en el flujo de proyectos que generan sobrecargas de trabajo para el personal. En ese mismo artículo este autor recomienda

para las empresas con este tipo de gestión de cartera de proyectos mejorar la estructura de selección de proyectos, utilizando mecanismos y herramientas que mejoren la selección y gestión de los proyectos.

La gestión actual de la cartera, por tanto, no permite a los decisores gestionar la evolución de los sistemas mantenidos adecuadamente, por lo que el sistema propuesto en esta tesis representa una mejora sustancial al sistema actual, en la línea antes comentada.

Evidentemente, la mayor parte de los proyectos que se consideran prioritarios con el sistema clásico de toma de decisiones están entre los primeros con el modelos ANP-BOCR. Sin embargo, otros proyectos, que con el modelo clásico no se habrían considerado para evaluación, aparecen propuesto en posiciones principales con el modelo ANP-BOCR, generándose un cambio en las prioridades de los proyectos y favoreciendo una evolución diferente de las instalaciones en el tiempo.

Con los resultados obtenidos, se ha generado una cartera ordenada de proyectos. Por tanto, se ha cumplido el tercer objetivo específico propuesto en esta tesis.

El enfoque adoptado para estudiar los proyectos también marca, desde un punto de vista técnico, como se han de mejorar los proyectos para cambiar su valoración y hacerlos más interesantes para el mantenedor. Por ejemplo, una renovación de vía completa entre Vara de Quart y Buñol es muy cara, afecta mucho al tráfico durante su realización y apenas aporta beneficios a la explotación una vez terminada, pero, tal vez, una renovación de vía enfocada a los puntos más problemáticos, donde se produzcan más roturas de carril, desgastes longitudinales etc.. tendría una valoración bastante mejor, al mantener o mejorar los beneficios y reducir costes y riesgos. Estos proyectos modificados se incluirían en una nueva iteración del proceso de selección.

Hay que tener en cuenta que más allá del análisis puro realizado en esta tesis, a la hora de ejecutar proyectos existen condicionantes externos que limitan la posibilidad de realizar los proyectos, como la disponibilidad económica, de personal técnico para realizarlos, la no concurrencia con otras actuaciones etc., por lo que solo los proyectos que estén entre los 10-20 primeros tendrían posibilidades reales de ejecutarse en un plazo corto, tras lo cual sería adecuado volver a realizar el análisis con una cartera renovada, eliminando los ya ejecutados y teniendo en cuenta los cambios que han generado estos y otros factores externos, como el cambio en el número de circulaciones, cambio en la composición de circulaciones, cambios en las incidencias, etc...

Es importante tener en cuenta también que, en una empresa de titularidad pública como ADIF, es importante que las decisiones de inversión se hagan de la forma más transparente y objetiva posible. En (Taylor, Kabir, Sadiq, & Tesfamariam, 2013b) se recomienda el uso de técnicas de análisis multicriterio para mejorar la transparencia, el análisis, la relación con las partes interesadas y la difusión pública del proceso de toma de decisiones en proyectos de infraestructuras. El enfoque multicriterio facilita que, dado el volumen económico de los proyectos considerados, la necesaria aprobación de todos los niveles de gestión técnica y económica implicados, haciendo más sencillo el transmitir a estas partes interesadas el origen de la decisión de inversión tomada y los parámetros considerados a la hora de realizarla.

6.6. Resultados obtenidos de la cartera de proyectos.

Los resultados definitivos se han presentado como una cartera, ya que aunque los objetivos generales comunes de la empresa son siempre los mismos no se considera el efecto de una gestión coordinada de los proyectos. La cartera de proyectos inicial es muy amplia, buscándose cubrir todas las posibilidades, por lo que, una vez priorizada y ordenada se puede hacer una segunda iteración, que genera una lista de proyectos a ejecutar.

Algunos proyectos son incompatibles técnicamente entre sí y si otros están contemplados parcialmente dentro de otros por lo que se ha realizado una matriz de incompatibilidades para que los proyectos de mayor prioridad eliminen del listado los que sean incompatibles con ellos.

Con este filtrado de proyectos, que se ha de realizar obligatoriamente después de la ordenación, convertimos la cartera en algo más interrelacionado y con más utilidad práctica. El listado definitivo, incluirá en las primeras posiciones proyectos que se pueden llevar a cabo simultáneamente y que no se perjudican entre sí.

Esta forma de gestionar la cartera permite marcar claramente qué proyectos son prioritarios en una línea y evitar realizar actuaciones incompatibles o contrarias en periodos cortos de tiempo.

Con los resultados obtenidos hemos podido ver que, pese a unas preferencias fuertes entre las familias de proyectos, ningún tipo de

proyecto queda completamente descartado del listado y es preferido frente a los proyectos incompatibles en algunos casos. Esto nos demuestra que, pese a la gran variedad de tipos de proyectos, no se han incluido tipos de proyectos irrelevantes o que no tengan aplicación real frente a sus alternativas y se ha podido demostrar también que no existen proyectos recomendables en todos los casos y que la aplicabilidad está muy condicionada la situación de la línea donde se va a aplicar el proyecto.

6.7. Líneas de trabajo futuras.

Los resultados obtenidos se pueden aplicar directamente a la cartera de proyectos de todas las jefaturas de mantenimiento de ADIF, siendo necesario analizar sólo la cartera de proyectos particular de cada territorio. En otras administraciones ferroviarias de España o Europa se podría aplicar también, pero sería necesario volver a analizar los criterios para poder capturar la experiencia de los decisores, sobre todo la vinculada a las condiciones específicas de cada administración.

Aunque los resultados obtenidos resultan bastante robustos, la combinación de lógica difusa con el método ANP-BOCR podría mejorar la fiabilidad de los resultados al capturar de forma clara la indeterminación inherente al análisis de datos cualitativos y a la poca precisión del análisis básico de los proyectos.

Para agilizar el análisis también sería interesante estudiar la forma de agrupar las alternativas, de forma previa a su análisis, para realizar el análisis completo sólo de las alternativas más interesantes previamente. Esta criba podría permitir el no usar las categorías y realizar comparaciones directas entre alternativas, que permite obtener resultados específicos para cada cartera de proyectos.

La investigación realizada sobre el estado del arte ha mostrado que no se están aplicando técnicas multicriterio a la modelización de los sistemas de transporte, con lo que, técnicas como la presentada en este trabajo podría emplearse en caracterización de infraestructuras, para por ejemplo, hacer previsiones de demanda de transporte o costes de explotación, comparando instalaciones existentes con las analizadas, utilizando en general varios criterios sin agregación en una función de utilidad.

Finalmente, tras el resultado obtenido, el concepto general del método y la estructura básica de este se podría adaptar para evaluar carteras de

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

proyectos de mejora sobre redes de infraestructuras o de servicios, como son las redes eléctricas, de gas, telecomunicaciones y carreteras. Esta ampliación del campo de uso requiere de un rediseño de los criterios y de la redes de relaciones pero con la experiencia obtenida en este trabajo el coste marginal de desarrollo sería reducido y se ha detectado un campo amplio de mejora de los proceso de priorización de carteras o programas de proyectos.

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

Capítulo 7

Referencias Bibliograficas.

- (EEA), E. E. A. (2014). What is the GDP share of infrastructure investment by mode in EEA Member Countries? Retrieved April 04, 2014, from <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/infrastructure-investments/assessment>
- Abril, M., Barber, F., Ingolotti, L., Salido, M. a., Tormos, P., & Lova, A. (2008). An assessment of railway capacity. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 44(5), 774–806. doi:10.1016/j.tre.2007.04.001
- ADIF. (2007). *Contrato - programa administración general del estado - adif 2007-2010* (p. 50). Madrid: ADIF.
- ADIF. (2013). *Declaración sobre la Red*.
- Adler, N., Pels, E., & Nash, C. (2010). High-speed rail and air transport competition: Game engineering as tool for cost-benefit analysis. *Transportation Research Part B: Methodological*, 44(7), 812–833. doi:10.1016/j.trb.2010.01.001

- Ahern, A., & Anandarajah, G. (2007). Railway projects prioritisation for investment: Application of goal programming. *Transport Policy*, 14(1), 70–80. doi:10.1016/j.tranpol.2006.10.003
- Al-harbi, K. M. A. (2001). Application of the AHP in project management. *International Journal of Project Management*, 19, 19–27.
- Ambrašaitė, I., Barfod, M. B., & Salling, K. B. . (2011). MCDA and Risk Analysis in Transport Infrastructure Appraisals: the Rail Baltica Case. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 20, 944–953. doi:10.1016/j.sbspro.2011.08.103
- Andersson, M., Smith, A., Wikberg, Å., & Wheat, P. (2012). Estimating the marginal cost of railway track renewals using corner solution models. *Transportation Research Part A*, 46(6), 954–964. doi:10.1016/j.tra.2012.02.016
- Aragónés-Beltrán, P., Chaparro-González, F., Pastor-Ferrando, J.-P., & Pla-Rubio, A. (2014). An AHP (Analytic Hierarchy Process)/ANP (Analytic Network Process)-based multi-criteria decision approach for the selection of solar-thermal power plant investment projects. *Energy*, 66, 222–238.
- Aragónés-Beltrán, P., Pastor-Ferrando, J. P., García-García, F., & Pascual-Agulló, A. (2010). An analytic network process approach for siting a municipal solid waste plant in the metropolitan area of Valencia (Spain). *Journal of Environmental Management*, 91(5), 1071–1086.
- Arentze, T., Bhar, C. R., Doherty, S. T., Gärling, T., Golledge, R. G., Golob, T. F., ... Hofman, F. (2003). *Transportation Systems: New Directions in Civil Engineering*. (K.G. Goulias, Ed.) (p. 427).
- Aritua, B., Smith, N. J., & Bower, D. (2011). What risks are common to or amplified in programmes: Evidence from UK public sector infrastructure schemes. *International Journal of Project Management*, 29(3), 303–312. doi:10.1016/j.ijproman.2010.04.004
- Arslan, T. (2008). A hybrid model of fuzzy and AHP for handling public assessments on transportation projects. *Transportation*, 36(1), 97–112. doi:10.1007/s11116-008-9181-9
- Asensio, J. (2000). The success story of Spanish suburban railways: determinants of demand and policy implications. *Transport Policy*, 7(4), 295–302. doi:10.1016/S0967-070X(00)00030-5
- Asensio, J., & Matas, A. (2008). Commuters' valuation of travel time variability. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 44(6), 1074–1085. doi:10.1016/j.tre.2007.12.002
- Bazzan, A. L. C. (2009). *Multi-Agent Systems for Traffic and Transportation Engineering*. (A. Bazzan & F. Klügl, Eds.) (p. 447). IGI Global. doi:10.4018/978-1-60566-226-8
- Behzadian, M., Kazemzadeh, R. B., Albadvi, a., & Aghdasi, M. (2010). PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies

- and applications. *European Journal of Operational Research*, 200(1), 198–215. doi:10.1016/j.ejor.2009.01.021
- Belton, V., & Stewart, T. J. (2002). *Multiple criteria decision analysis: an integrated approach*. Springer.
- Betancor, O. (2009). *Manuales y procedimientos para la evaluación de proyectos de transporte*.
- Bigotte, J. F., Krass, D., Antunes, A. P., & Berman, O. (2010). Integrated modeling of urban hierarchy and transportation network planning. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 44(7), 506–522. doi:10.1016/j.tra.2010.03.020
- Bouch, C. J., Roberts, C., & Amooore, J. (2010). Development of a common set of European high-level track maintenance cost categories. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 224(4), 327–335. doi:10.1243/09544097JRRT316
- Bouyssou, D., Marchant, T., Pirlot, M., Perny, P., Tsoukií's, A., & Vincke, P. (n.d.). *Evaluation and Decision Models: A critical perspective*. 2000. Kluwer Academic Publishers.
- Bouyssou, D., Marchant, T., Pirlot, M., Tsoukiàs, A., & Vincke, P. (2006). *Evaluation and decision models with multiple criteria: Stepping stones for the analyst* (Vol. 86). Springer Science & Business Media.
- Bradley, M. (1993). Analysing demand for rail travel: *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 27(5), 412–413. Retrieved from <http://econpapers.repec.org/RePEc:eee:transa:v:27:y:1993:i:5:p:412-413>
- Brans, J.-P., Vincke, P., & Mareschal, B. (1986). How to select and how to rank projects: The PROMETHEE method. *European Journal of Operational Research*, 24(2), 228–238.
- Breu, F., Guggenbichler, S., & Wollmann, J. (2008). *Guide to Cost Benefit Analysis of Investment Projects*. Vasa. Retrieved from <http://medcontent.metapress.com/index/A65RM03P4874243N.pdf>
- Brons, M., Givoni, M., & Rietveld, P. (2009). Access to railway stations and its potential in increasing rail use. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965856408001456>
- Brons, M., Nijkamp, P., Pels, E., & Rietveld, P. (2003). Railroad noise: economic valuation and policy. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 8(3), 169–184. doi:10.1016/S1361-9209(02)00048-2
- Brugha, C. (1998). Structuring and weighting criteria in multi criteria decision making (MCDM). *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, 229–242. Retrieved from

- [http://mis.ucd.ie/Members/cbrugha/pubs/Brugha Structuring and Weighting Criteria MCDM98.pdf](http://mis.ucd.ie/Members/cbrugha/pubs/Brugha_Structuring_and_Weighting_Criteria_MCDM98.pdf)
- Bruzelius, N., Flyvbjerg, B., & Rothengatter, W. (2002). Big decisions, big risks. Improving accountability in mega projects. *Transport Policy*, 9(2), 143–154. doi:10.1016/S0967-070X(02)00014-8
- Buehler, R., Griffin, D., & Peetz, J. (2010). The Planning Fallacy: Cognitive, Motivational, and Social Origins (Vol. 43, p. 62). doi:10.1016/S0065-2601(10)43001-4
- Cantarelli, C. C., Molin, E. J. E., van Wee, B., & Flyvbjerg, B. (2012). Characteristics of cost overruns for Dutch transport infrastructure projects and the importance of the decision to build and project phases. *Transport Policy*, 22, 49–56. doi:10.1016/j.tranpol.2012.04.001
- Carretero, J., Pérez, J. M., García-Carballeira, F., Calderón, A., Fernández, J., García, J. D., ... Prete, P. (2003). Applying RCM in large scale systems: a case study with railway networks. *Reliability Engineering & System Safety*, 82(3), 257–273. doi:10.1016/S0951-8320(03)00167-4
- CENELEC, E. (1999). 50126 (1999): Railway applications--The specification and demonstration of Reliability. *Availability, Maintainability and Safety (RAMS)*.
- Certa, A., Galante, G., Lupo, T., & Passannanti, G. (2011). Determination of Pareto frontier in multi-objective maintenance optimization. *Reliability Engineering & System Safety*, 96(7), 861–867. doi:10.1016/j.ress.2010.12.019
- Commission, E. (2011). *Libro Blanco: Hoja de ruta hacia un espacio unico europeo de transporte: por un a politica de transportes competitiva y sostenible* (p. 35).
- Commission, I. E., & others. (2000). Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety related systems. *IEC 61508*.
- Cooper, R., & Edgett, S. (2001). Portfolio management for new products: picking the winners. *Product Development Institute, Ancaster, ...*, (11). Retrieved from http://www.stage-gate.com/downloads/wp/wp_11.pdf
- Coto-Millán, P. (2011). Social Profitability Threshold of High Speed Railway: A Benefit-Cost Analysis. *Journal of Transportation Technologies*, 01(04), 107–115. doi:10.4236/jtts.2011.14014
- Crespo, A., & Gupta, J. N. D. (2006). Contemporary maintenance management: process, framework and supporting pillars. *Omega*, 34, 313–326. doi:10.1016/j.omega.2004.11.003
- Dağdeviren, M., & Eraslan, E. (2008). Priority determination in strategic energy policies in Turkey using analytic network process (ANP) with group decision making. *International Journal of Energy Research*, 32(11), 1047–1057. doi:10.1002/er.1418

- Damart, S., & Roy, B. (2009). The uses of cost-benefit analysis in public transportation decision-making in France. *Transport Policy*, 16(4), 200–212. doi:10.1016/j.tranpol.2009.06.002
- De Rus, G., Barron, I., & Campos, J. (2009). *El transporte ferroviario de alta velocidad: Una visión económica*. Spied Photos. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:3+2009#9>
- De Rus, G., Betancor, O., Campos, J., Eugenio, J. L., Socorro, P., Matas, A., ... Benavides, J. (2010). *Evaluación económica de proyectos de transporte*. (G. de Rus, Ed.) (p. 157). Ministerio de Fomento.
- De Rus, G., & Inglada, V. (1997). Cost-benefit analysis of the high-speed train in Spain. *The Annals of Regional Science*, 31(2), 175–188. doi:10.1007/s001680050044
- Debrezion, G., Pels, E., & Rietveld, P. (2009). Modelling the joint access mode and railway station choice. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 45(1), 270–283. doi:10.1016/j.tre.2008.07.001
- Dicembre, a., & Ricci, S. (2011). Railway traffic on high density urban corridors: Capacity, signalling and timetable. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 1(2), 59–68. doi:10.1016/j.jrtpm.2011.11.001
- Ding-Zhu, D. (Ed.). (2009). *TRANSPORTATION SYSTEMS: Optimization and Its Applications* (p. 752). Springer.
- Durango-Cohen, P. L., & Madanat, S. M. (2008). Optimization of inspection and maintenance decisions for infrastructure facilities under performance model uncertainty: A quasi-Bayes approach. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 42(8), 1074–1085. doi:10.1016/j.tra.2008.03.004
- Durango-Cohen, P. L., & Sarutipand, P. (2009). Maintenance optimization for transportation systems with demand responsiveness. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 17(4), 337–348. doi:10.1016/j.trc.2009.01.001
- Econom, R. D. E., & Transporte, D. E. L. (n.d.). Economía del transporte (pp. 1–20).
- Einstein, A., & Infeld, L. (1939). La física: aventura del pensamiento.
- Emberger, G., Pfaffenbichler, P., Jaensirisak, S., & Timms, P. (2008). “Ideal” decision-making processes for transport planning: A comparison between Europe and South East Asia. *Transport Policy*, 15(6), 341–349. doi:10.1016/j.tranpol.2008.12.009
- Europeo, P. DIRECTIVA 2004/49/CE Directiva de seguridad ferroviaria (2004).
- Europeo, P. DIRECTIVA 2008/57/CE sobre la interoperabilidad del sistema ferroviario dentro de la Comunidad (2008).

- Figueira, J., Greco, S., & Ehrgott, M. (2005). *Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys* (Vol. 78). Springer Science & Business Media.
- Fitzroy, F., Smith, I., & Germany, W. (1995). The demand for rail transport in European countries, 2(3), 153–158.
- Flyvbjerg, B. (2004). Cinco malentendidos acerca de la investigación mediante los estudios de caso. *Revista Española de Investigaciones Sociológicas*, 33–62. Retrieved from <http://reis.metapress.com/index/3878412020485720.pdf>
- Flyvbjerg, B. (2007a). Cost Overruns and Demand Shortfalls in Urban Rail and Other Infrastructure. *Transportation Planning and Technology*, 30(1), 9–30. doi:10.1080/03081060701207938
- Flyvbjerg, B. (2007b). Policy and planning for large-infrastructure projects: problems, causes, cures. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 34(4), 578–597. doi:10.1068/b32111
- Flyvbjerg, B. (2009). Survival of the unfittest: why the worst infrastructure gets built--and what we can do about it. *Oxford Review of Economic Policy*, 25(3), 344–367. doi:10.1093/oxrep/grp024
- Flyvbjerg, B., Holm, M. K. S., & Buhl, S. (2003). How common and how large are cost overruns in transport infrastructure projects? *Transport Reviews*, 71–88. doi:10.1080/0144164022000016667
- Gandibleux, X., Riteau, P., & Delorme, X. (2008). RECIFE: a MCDSS for Railway Capacity Objectives of RECIFE project Research project with INRETS and SNCF: • Tools integrated in a decision support software – Pierrefitte-Gonesse node (junction), (1), 1–33.
- García Álvarez, A. (2007). Consumo de energía y emisiones del tren de alta velocidad en comparación con otros modos de transporte. *Anales de Mecánica Y Electricidad*. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Consumo+de+energía+y+emisiones+del+tren+de+alta+velocidad+en+comparación+con+otros+modos+de+transporte#0>
- García Álvarez, A. (2010). *La vía doble en España y el sentido de circulación de los trenes por ella* (p. 50). Fundación de los Ferrocarriles Españoles.
- Gerçek, H., Karpak, B., & Kilinçaslan, T. (2004). A multiple criteria approach for the evaluation of the rail, (May 1991), 203–228.
- Gervásio, H., & Simões da Silva, L. (2012). A probabilistic decision-making approach for the sustainable assessment of infrastructures. *Expert Systems with Applications*, 39(8), 7121–7131. doi:10.1016/j.eswa.2012.01.032
- Giezen, M. (2012). Keeping it simple? A case study into the advantages and disadvantages of reducing complexity in mega project planning. *International Journal of Project Management*, 30(7), 781–790. doi:10.1016/j.ijproman.2012.01.010

- Goodwin, P., & Wright, G. (2004). *Decision Analysis for Management Judgment*.
- Guitouni, A., & Martel, J.-M. (1998). Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method. *European Journal of Operational Research*, 109(2), 501–521. doi:10.1016/S0377-2217(98)00073-3
- Hammond, J. S., Keeney, R. L., & Raiffa, H. (2001). Las trampas ocultas de la adopción de decisiones. In *La toma de decisiones* (pp. 159–188).
- Hammond, J. S., Keeney, R., & Raiffa, H. (2002). Smart choices: A practical guide to making better decisions, 1–26. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Smart+Choices:+A+Practical+Guide+to+Making+Better+Life+Decisions#0>
- Henig, M. I., & Buchanan, J. T. (1996). Solving MCDM problems: Process concepts. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 5(1), 3–21. doi:10.1002/(SICI)1099-1360(199603)5:1<3::AID-MCDA85>3.0.CO;2-6
- Hensher, D. A., & McLeod, P. B. (1977). Towards an integrated approach to the identification and evaluation of the transport determinants of travel choices. *Transportation Research*, 11(2), 77–93. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/0041-1647\(77\)90106-X](http://dx.doi.org/10.1016/0041-1647(77)90106-X)
- Holz-Rau, C., & Scheiner, J. (2011). Safety and travel time in cost-benefit analysis: A sensitivity analysis for North Rhine-Westphalia. *Transport Policy*, 18(2), 336–346. doi:10.1016/j.tranpol.2010.10.001
- Huisman, T., & Boucherie, R. J. (2001). Running times on railway sections with heterogeneous train traffic, 35.
- Hyun, J. (2005). DEVELOPMENT OF THE FEASIBILITY EVALUATION MODEL FOR, 6, 292–302.
- Ieda, H., Kanayama, Y., Ota, M., Yamazaki, T., & Okamura, T. (2001). How can the quality of rail services in Tokyo be further improved? *Transport Policy*, 8(2), 97–106. doi:10.1016/S0967-070X(01)00002-6
- International Project Management Association. (2009). *NCB 3.1 Bases para la Competencia en Dirección de Proyectos* (p. 236). AEIPRO.
- Ishizaka, A., & Labib, A. (2011). Review of the main developments in the analytic hierarchy process. *Expert Systems with Applications*, 38(11), 14336–14345. doi:10.1016/j.eswa.2011.04.143
- Ishizaka, A., & Nemery, P. (2013). *Multi-criteria decision analysis: methods and software*. John Wiley & Sons.
- Ivanović, I., Grujičić, D., Macura, D., Jović, J., & Bojović, N. (2013). One approach for road transport project selection. *Transport Policy*, 25, 22–29. doi:10.1016/j.tranpol.2012.10.001
- Jain, A., Murty, M., & Flynn, P. (1999). Data clustering: a review. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 31(3). Retrieved from <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=331504>

- Jiménez, J., & Betancor, O. (2012). When trains go faster than planes: The strategic reaction of airlines in Spain. *Transport Policy*, 1–23. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967070X1200087X>
- Johansson, P., & Nilsson, J.-E. (2004). An economic analysis of track maintenance costs. *Transport Policy*, 11(3), 277–286. doi:10.1016/j.tranpol.2003.12.002
- Keeney, R. L. (1992). On the foundations of prescriptive decision analysis. In *Utility theories: Measurements and applications* (pp. 57–72). Springer.
- Keeney, R. L., & Raiffa, H. (1976). *Decisions with multiple objectives*. 1976. John Wiley&Sons, New York.
- Keisler, J. (2008). The value of assessing weights in multi-criteria portfolio decision analysis. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 123, 111–123. doi:10.1002/mcda
- Kester, L., Hultink, E. J., & Lauche, K. (2009). Portfolio decision-making genres: A case study. *Journal of Engineering and Technology Management*, 26(4), 327–341. doi:10.1016/j.jengtecman.2009.10.006
- Kim, D., Chung, S., SONG, K., & HONG, S. (2005). Development Of An Assessment Model Using AHP Technique For Railroad Projects Experiencing Severe Conflicts In Korea. ... *of the Eastern Asia Society for ...*, 5, 2260–2274. Retrieved from http://www.easts.info/online/proceedings_05/2260.pdf
- King, J. (1996). Economic significance of high speed rail. In *AUSTRALASIAN TRANSPORT RESEARCH FORUM (ATRF), 20TH, 1996, AUCKLAND, NEW ZEALAND, VOLUME 20, PART 2*.
- Koot, R., & TYWORTH, J. (1985). Railroad Track Quality Measurement by Multivariate Statistical Analysis. *Transportation Journal*, 51–66. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/10.2307/20712840>
- Koppenjan, J., Veeneman, W., van der Voort, H., ten Heuvelhof, E., & Leijten, M. (2011). Competing management approaches in large engineering projects: The Dutch RandstadRail project. *International Journal of Project Management*, 29(6), 740–750. doi:10.1016/j.ijproman.2010.07.003
- Korhonen, P., Moskowitz, H., & Wallenius, J. (1992). Multiple criteria decision support - A review. *European Journal of Operational Research*, 63(3), 361–375. doi:http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217(92)90155-3
- Kwok, E. C. S., Anderson, P. M., & Ng, S. H. S. (2010). Value engineering for railway construction projects: cost driver analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 224(1), 45–52. doi:10.1243/09544097JRR291
- Laird, J., Geurs, K., & Nash, C. (2009). Option and non-use values and rail project appraisal. *Transport Policy*, 16(4), 173–182. doi:10.1016/j.tranpol.2009.05.002

- Loizides, J., & Tsionas, E. G. (2002). Productivity growth in European railways: a new approach. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 36(7), 633–644. doi:10.1016/S0965-8564(01)00027-1
- Lopez-pita, A. (2006). *Infraestructuras Ferroviarias*. UPC.
- Lycett, M., Rassau, A., & Danson, J. (2004). Programme management: a critical review. *International Journal of Project Management*, 22(4), 289–299. doi:10.1016/j.ijproman.2003.06.001
- Macharis, C., & Bernardini, A. (2015). Reviewing the use of Multi-Criteria Decision Analysis for the evaluation of transport projects: Time for a multi-actor approach. *Transport Policy*, 37, 177–186. doi:10.1016/j.tranpol.2014.11.002
- Macharis, C., De Witte, A., & Turcksin, L. (2010). The Multi-Actor Multi-Criteria Analysis (MAMCA) application in the Flemish long-term decision making process on mobility and logistics. *Transport Policy*, 17(5), 303–311. doi:10.1016/j.tranpol.2010.02.004
- MacQueen, J. (1967). Some methods for classification and analysis of multivariate observations. *Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on ...*, 233(233), 281–297. Retrieved from http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=IC4Ku_7dBFUC&oi=fnd&pg=PA281&dq=SOME+METHODS+FOR+CLASSIFICATION+AND+ANALYSIS+OF+MULTIVARIATE+OBSERVATIONS&ots=nMZdE-GboP&sig=-JOfHunBqq7ArfQMjGLy1yTApAk
- Make, P., & Preston, J. (1998). TRANSPORT POLICY Twenty-one sources of error and bias in transport project appraisal, 5.
- Mandic, D., Jovanovic, P., & Bugarinovic, M. (2014). Two-phase model for multi-criteria project ranking: Serbian Railways case study. *Transport Policy*, 36, 88–104. doi:10.1016/j.tranpol.2014.08.002
- Mendoza, G. de R., Cruz, O., & Méndez, J. (2006). *Evaluación Económica de Proyectos de Transporte*. Banco Interamericano de Banco Interamericano de Desarrollo. Retrieved from https://www.mtc.gob.pe/portal/consultas/cid/Boletines_CID/24_JULIO/ARCHIVO/Evaluacion.pdf
- Millet, I., & Saaty, T. L. (2000). On the relativity of relative measures – accommodating both rank preservation and rank reversals in the AHP. *European Journal of Operational Research*, 121(1), 205–212. doi:10.1016/S0377-2217(99)00040-5
- Mokhtarian, P. L., & Salomon, I. (2001). How derived is the demand for travel? Some conceptual and measurement considerations. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 35(695-719), 26.
- Montesinos Valera, J. (2011). Diseño de una metodología para la selección de actuaciones de mejora en la red convencional de ADIF mediante el Proceso Analítico Jerárquico.

- Morisugi, H. (2000). Evaluation methodologies of transportation projects in Japan. *Transport Policy*, 7(1), 35–40. doi:10.1016/S0967-070X(00)00013-5
- Mouter, N., Annema, J. A., & Wee, B. Van. (2013). Attitudes towards the role of Cost – Benefit Analysis in the decision-making process for spatial-infrastructure projects: A Dutch case study. *TRANSPORTATION RESEARCH PART A*, 58, 1–14. doi:10.1016/j.tra.2013.10.006
- Muchiri, P., Pintelon, L., Gelders, L., & Martin, H. (2011). Development of maintenance function performance measurement framework and indicators. *International Journal of Production Economics*, 131(1), 295–302. doi:10.1016/j.ijpe.2010.04.039
- Murthy, D. (2002). Strategic maintenance management. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, (2002). doi:10.1108/13552510210448504
- Nyström, B., & Söderholm, P. (2010). Selection of maintenance actions using the analytic hierarchy process (AHP): decision-making in railway infrastructure. *Structure and Infrastructure Engineering*, 6(4), 467–479. doi:10.1080/15732470801990209
- Olsson, N. O. E., Økland, A., & Halvorsen, S. B. (2012). Consequences of differences in cost-benefit methodology in railway infrastructure appraisal—A comparison between selected countries. *Transport Policy*, 22, 29–35. doi:10.1016/j.tranpol.2012.03.005
- Özgür, Ö. (2011). Performance analysis of rail transit investments in Turkey: İstanbul, Ankara, İzmir and Bursa. *Transport Policy*, 18(1), 147–155. doi:10.1016/j.tranpol.2010.07.004
- Özkır, V., & Demirel, T. (2012). A fuzzy assessment framework to select among transportation investment projects in Turkey. *Expert Systems with Applications*, 39(1), 74–80. doi:10.1016/j.eswa.2011.06.051
- Partington, D., Pellegrinelli, S., & Young, M. (2005). Attributes and levels of programme management competence: an interpretive study. *International Journal of Project Management*, 23(2), 87–95. doi:10.1016/j.ijproman.2004.06.004
- Pastor-Ferrando, J. P. (2007). *Aplicación de las técnicas anp y ahp, de análisis multicriterio de decisiones, a la selección y ponderación de criterios en las adjudicaciones de los contratos públicos de obra*. Universitat Politècnica de València.
- Pellegrinelli, S., Partington, D., Hemingway, C., Mohdzain, Z., & Shah, M. (2007). The importance of context in programme management: An empirical review of programme practices. *International Journal of Project Management*, 25(1), 41–55. doi:10.1016/j.ijproman.2006.06.002
- Pomerol, J.-C., & Barba-Romero, S. (2000). *Multicriterion decision in management: principles and practice* (Vol. 25). Springer Science & Business Media.

- Ponchet, A., Fouladirad, M., & Grall, A. (2010). Assessment of a maintenance model for a multi-deteriorating mode system. *Reliability Engineering & System Safety*, 95(11), 1244–1254. doi:10.1016/j.res.2010.06.021
- Ríos Insua, S., Bielza Lozoya, C., & Mateos Caballero, A. (2002). *Fundamentos de los Sistemas de Ayuda a la Decisión*. Ra-Ma.
- Romero, C. (1993). *Teoría de la decisión multicriterio: conceptos, técnicas y aplicaciones*. Alianza editorial.
- Rosqvist, T., Laakso, K., & Reunanen, M. (2009). Value-driven maintenance planning for a production plant. *Reliability Engineering & System Safety*, 94(1), 97–110. doi:10.1016/j.res.2007.03.018
- Roy, B. (1991). THE OUTRANKING FOUNDATIONS APPROACH AND THE METHODS. *Theory and Decision*, 49–73.
- Roy, B., & Vincke, P. (1981). Multicriteria analysis: survey and new directions. *European Journal of Operational Research*, 8(3), 207–218.
- Saaty, T. L. (1980). AHP: The Analytic Hierarchy Process. McGraw-Hill.
- Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: the analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 48(1), 9–26. doi:10.1016/0377-2217(90)90057-I
- Saaty, T. L. (1994a). *Fundamentals of decision making and priority theory with the analytic hierarchy process. (The Analytic Hierarchy Process Series, vol. 6)*, Pittsburgh. RWS Publications, Pittsburgh.
- Saaty, T. L. (1994b). How to make a decision: the analytic hierarchy process. *Interfaces*, 24(6), 19–43.
- Saaty, T. L. (1996). Mathematics and Multicriteria Decision Making. *Mathematics Awareness Week*.
- Saaty, T. L. (1999). *Decision making for leaders: The analytic hierarchy process for decisions in a complex world, new edition 2001 (analytic hierarchy process series, vol. 2)*. PA: RWS Publications.
- Saaty, T. L. (2001). *The analytic network process: decision making with dependence and feedback; the organization and prioritization of complexity*. Rws publications.
- Saaty, T. L. (2005). *Theory and applications of the analytic network process: decision making with benefits, opportunities, costs, and risks*. RWS publications.
- Saaty, T. L. (2006). Rank from comparisons and from ratings in the analytic hierarchy/network processes. *European Journal of Operational Research*, 168(2), 557–570. doi:10.1016/j.ejor.2004.04.032
- Saaty, T. L. (2008a). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83. doi:10.1504/IJSSCI.2008.017590
- Saaty, T. L. (2008b). Relative Measurement and Its Generalization in Decision Making Why Pairwise Comparisons are Central in

- Mathematics for the Measurement of Intangible Factors The Analytic Hierarchy/Network Process, *102*(2), 251–318.
- Saaty, T. L. (2013). The Modern Science of Multicriteria Decision Making and Its Practical Applications: The AHP / ANP Approach. *Operations Research*, *61*(September-October), 1101–1118.
- Saaty, T. L., & Peniwati, K. (2008). Group decision making. RWS Publications 4922, Ellsworth Avenue, Pittsburgh, PA 15213.
- Saaty, T. L., & Sagir, M. (2009). An essay on rank preservation and reversal. *Mathematical and Computer Modelling*, *49*(5-6), 1230–1243. doi:10.1016/j.mcm.2008.08.001
- Saaty, T. L., & Shih, H.-S. (2009). Structures in decision making: On the subjective geometry of hierarchies and networks. *European Journal of Operational Research*, *199*(3), 867–872. doi:10.1016/j.ejor.2009.01.064
- Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (1998). THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS, *46*(April 1997), 491–503.
- Salling, K. B., & Banister, D. (2009). Assessment of large transport infrastructure projects: The CBA-DK model. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *43*(9-10), 800–813. doi:10.1016/j.tra.2009.08.001
- Salling, K. B., & Leleur, S. (2011). Transport appraisal and Monte Carlo simulation by use of the CBA-DK model. *Transport Policy*, *18*(1), 236–245. doi:10.1016/j.tranpol.2010.08.007
- Sayers, T. M., Jessop, a. T., & Hills, P. J. (2003). Multi-criteria evaluation of transport options—flexible, transparent and user-friendly? *Transport Policy*, *10*(2), 95–105. doi:10.1016/S0967-070X(02)00049-5
- Schöbel, A. (2009). Capacity constraints in delay management. *Public Transport*, *1*(2), 135–154. doi:10.1007/s12469-009-0010-0
- Schwanen, T., & Dijst, M. (2002). Travel-time ratios for visits to the workplace: the relationship between commuting time and work duration, *36*, 573–592.
- Seabright, P. (ed). (2003). *IDEI Report # 1 Rail Transport* (p. 123).
- Seyedshohadaie, S. R., Damnjanovic, I., & Butenko, S. (2010). Risk-based maintenance and rehabilitation decisions for transportation infrastructure networks. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *44*(4), 236–248. doi:10.1016/j.tra.2010.01.005
- Shelton, J., & Medina, M. (2010). Integrated Multiple-Criteria Decision-Making Method to Prioritize Transportation Projects. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, *2174*(-1), 51–57. doi:10.3141/2174-08
- Short, J., & Kopp, A. (2005). Transport infrastructure: investment and planning. Policy and research aspects. *Transport Policy*, *12*, 360–367. doi:10.1016/j.tranpol.2005.04.003

- Silmon, J. a, & Roberts, C. (2010). Improving railway switch system reliability with innovative condition monitoring algorithms. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 224(4), 293–302. doi:10.1243/09544097JRRT313
- Sipahi, S., & Timor, M. (2010). The analytic hierarchy process and analytic network process: an AHP and ANP: an overview of applications. *Management Decision*, 48(5), 775 – 808.
- Smith-Perera, A., García-Melón, M., Poveda-Bautista, R., & Pastor-Ferrando, J.-P. (2010). A Project Strategic Index proposal for portfolio selection in electrical company based on the Analytic Network Process. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(6), 1569–1579. doi:10.1016/j.rser.2010.01.022
- Societies, E. F. of national maintenance. (n.d.). EFNMS. Retrieved April 06, 2014, from <http://www.efnms.org/What-EFNMS-stands-for/m1312/What-EFNMS-stands-for.html>
- Sohn, K. (2008). A systematic decision criterion for the elimination of useless overpasses. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 42(8), 1043–1055. doi:10.1016/j.tra.2008.03.003
- Sommer, S. C., & Loch, C. H. (2004). Selectionism and Learning in Projects with Complexity and Unforeseeable Uncertainty. *Management Science*, 50(10), 1334–1347. doi:10.1287/mnsc.1040.0274
- Sullivan, J. L., Novak, D. C., Aultman-Hall, L., & Scott, D. M. (2010). Identifying critical road segments and measuring system-wide robustness in transportation networks with isolating links: A link-based capacity-reduction approach. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 44(5), 323–336. doi:10.1016/j.tra.2010.02.003
- Sussman, J. (2000). *Introduction to transportation systems*.
- Taylor, P., Kabir, G., Sadiq, R., & Tesfamariam, S. (2013a). A review of multi-criteria decision-making methods for infrastructure management. *Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance*, (November), 37–41. doi:10.1080/15732479.2013.795978
- Taylor, P., Kabir, G., Sadiq, R., & Tesfamariam, S. (2013b). Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance , Management , Life-Cycle Design and Performance A review of multi-criteria decision-making methods for infrastructure management, (November), 37–41. doi:10.1080/15732479.2013.795978
- Thiry, M. (2004). “For DAD”: a programme management life-cycle process. *International Journal of Project Management*, 22(3), 245–252. doi:10.1016/S0263-7863(03)00064-4

- Thomaidis, F., & Mavrakis, D. (2006). Optimum route of the south transcontinental gas pipeline in SE Europe using AHP. *Journal of Multi-Criteria Decision ...*, 88, 77–88. doi:10.1002/mcda
- Thomas, L. J., Rhind, D. J. a., & Robinson, K. J. (2005). Rail passenger perceptions of risk and safety and priorities for improvement. *Cognition, Technology & Work*, 8(1), 67–75. doi:10.1007/s10111-005-0021-9
- Tsamboulas, D. a. (2007). A tool for prioritizing multinational transport infrastructure investments. *Transport Policy*, 14(1), 11–26. doi:10.1016/j.tranpol.2006.06.001
- Tudela, A., Akiki, N., & Cisternas, R. (2006). Comparing the output of cost benefit and multi-criteria analysis. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 40(5), 414–423. doi:10.1016/j.tra.2005.08.002
- Ülengin, F., Önsel, Ş., İlker Topçu, Y., Aktaş, E., & Kabak, Ö. (2007). An integrated transportation decision support system for transportation policy decisions: The case of Turkey. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 41(1), 80–97. doi:10.1016/j.tra.2006.05.010
- Vaidya, O. S., & Kumar, S. (2006). Analytic hierarchy process: An overview of applications, 169, 1–29. doi:10.1016/j.ejor.2004.04.028
- Van Wee, B. (2012). How suitable is CBA for the ex-ante evaluation of transport projects and policies? A discussion from the perspective of ethics. *Transport Policy*, 19(1), 1–7. doi:10.1016/j.tranpol.2011.07.001
- Vatn, J., & Aven, T. (2010). An approach to maintenance optimization where safety issues are important. *Reliability Engineering & System Safety*, 95(1), 58–63. doi:10.1016/j.ress.2009.06.002
- Wallenius, J., Dyer, J. S., Fishburn, P. C., Steuer, R. E., Zionts, S., & Deb, K. (2008). Multiple Criteria Decision Making, Multiattribute Utility Theory: Recent Accomplishments and What Lies Ahead. *Management Science*, 54(7), 1336–1349. doi:10.1287/mnsc.1070.0838
- Wijnmalen, D. J. D., & Wedley, W. C. (2009). Correcting Illegitimate Rank Reversals: Proper Adjustment of Criteria Weights Prevent Alleged AHP Intransitivity, 141, 135–141. doi:10.1002/mcda
- Xu, R., & Wunsch, D. (2005). Survey of clustering algorithms. *IEEE Transactions on Neural Networks / a Publication of the IEEE Neural Networks Council*, 16(3), 645–78. doi:10.1109/TNN.2005.845141
- Yedla, S., & Shrestha, R. M. (2003). Multi-criteria approach for the selection of alternative options for environmentally sustainable transport system in Delhi. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 37(8), 717–729. doi:10.1016/S0965-8564(03)00027-2
- Yoon, K., & Hwang, C. L. (1981). TOPSIS (technique for order preference by similarity to ideal solution)--a multiple attribute decision making, w: Multiple attribute decision making--methods and applications, a state-of-the-at survey. Berlin: Springer Verlag.

- Yuan, S., Xu, J., & Yang, L. (2006). The impact of Dunhuang railway construction on land desertification. *Journal of Geographical Sciences*, 16(1), 99–104.
- Zanakis, S., Solomon, A., Wishart, N., & Dubish, S. (1998). Multi-attribute decision making: A simulation comparison of select methods. *European Journal of ...*, 2217(97). Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221797001471>

Aplicación de las técnicas AHP, ANP-BC y ANP-BOCR de análisis multicriterio de decisiones a la selección de carteras de proyectos de mantenimiento, rehabilitación y mejora en infraestructuras ferroviarias.

Anexo 1.- Proyectos considerados y valoraciones de las categorías.

Anexo 2.- Tabla de comparaciones pareadas de las categorías.

Anexo 3.- Cuestionario tipo de priorización de criterios.

Anexo 4.- Grupo de proyectos representativos para análisis de sensibilidad.

Anexo 5.- Proyectos considerados y su peso en ANP-BOCR

Anexo 6.- Matriz de incompatibilidades entre proyectos.

Anexo 1. Proyectos considerados y
valoración de las alternativas.

Anexo 2. Tabla de comparaciones pareadas de las categorías.

Las comparaciones pareadas de las categorías utilizadas, se detallan a continuación, para cada una de las categorías utilizadas en los modelos.

Para cada categoría se incluye la matriz de comparación y los pesos ideales obtenidos. Los datos se muestran mediante imágenes de la representación que realiza el software Superdecisions.

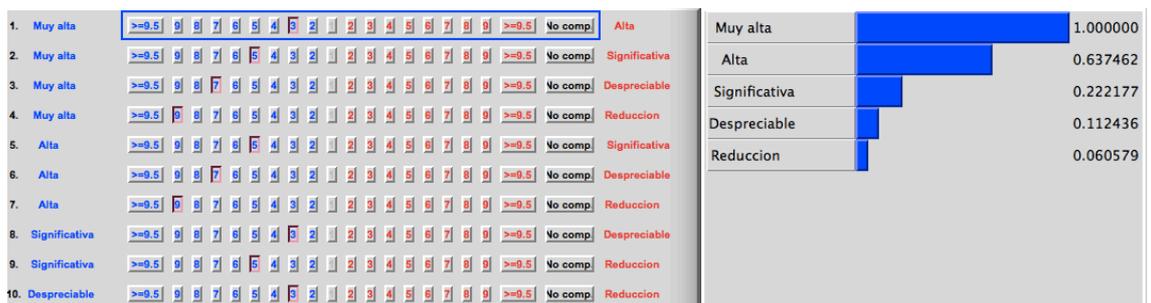
Criterios utilizados en el modelo AHP y ANP-BC.

Grupo de criterios CSC. Criterios de Seguridad en la circulación.

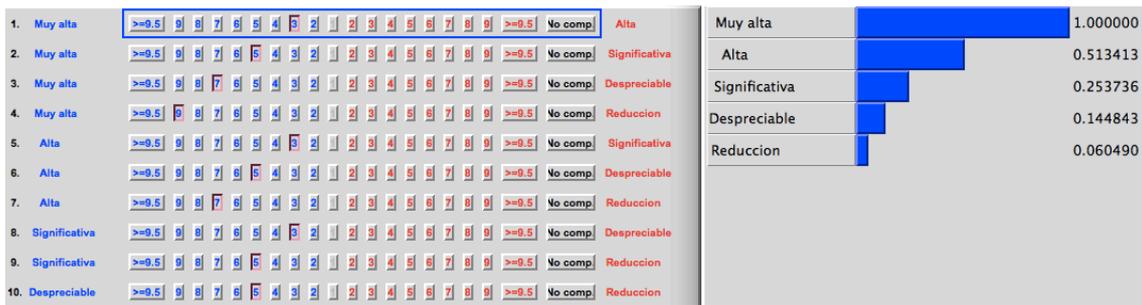
CSC.C1.- Reducción del numero de pasos a nivel.



CSC.C2.- Mejora de la señalización de pasos a nivel.



CSC.C3.- Mejora de los sistemas de ayuda a la conducción.

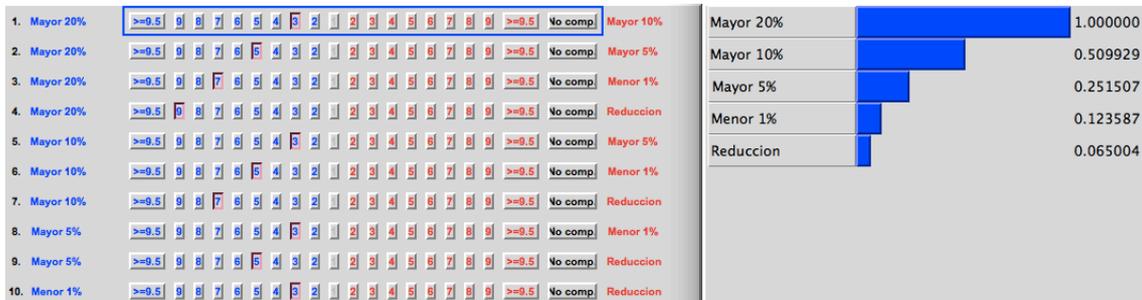


CSC.C4.- Automatización de Itinerarios y bloqueos.

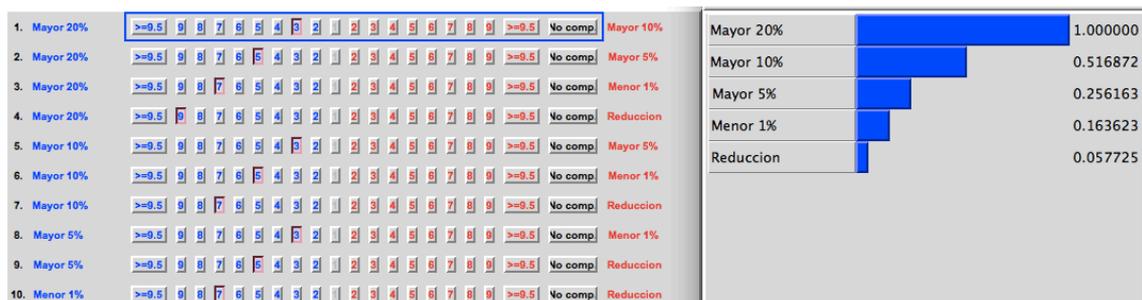


Grupo de criterios CSE. Criterios de Eficiencia en la explotación.

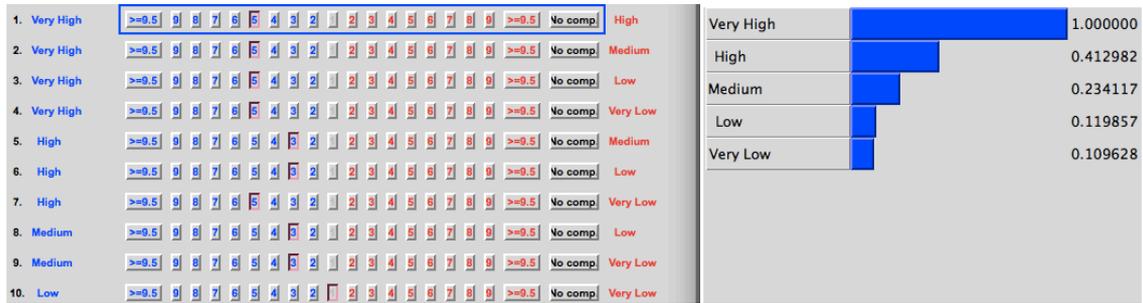
CSE.C5.- Reducción de los tiempos de viaje.



CSE.C6.- Reducción del cantón crítico.



CSE.C15.- Aumento del numero de circulaciones.

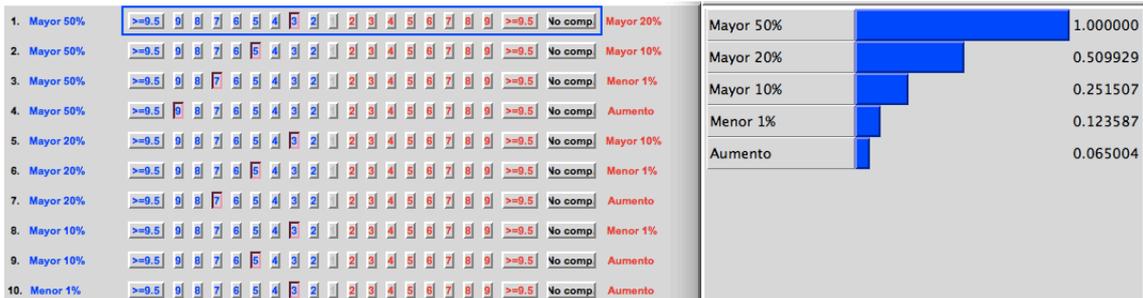


CSE.C7.- Mejora de los sistemas de explotación.



Grupo de criterios CET. Criterios de Eficiencia Técnica.

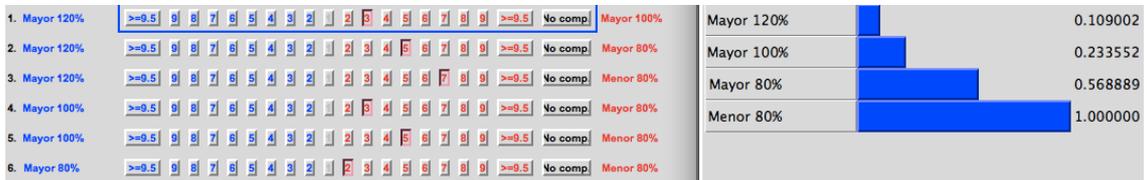
CET.C8.- Reducción en el numero de incidencias.



CET.C9.- Reducción de los retrasos.



CET.C16.- Reducción de los costes de mantenimiento.

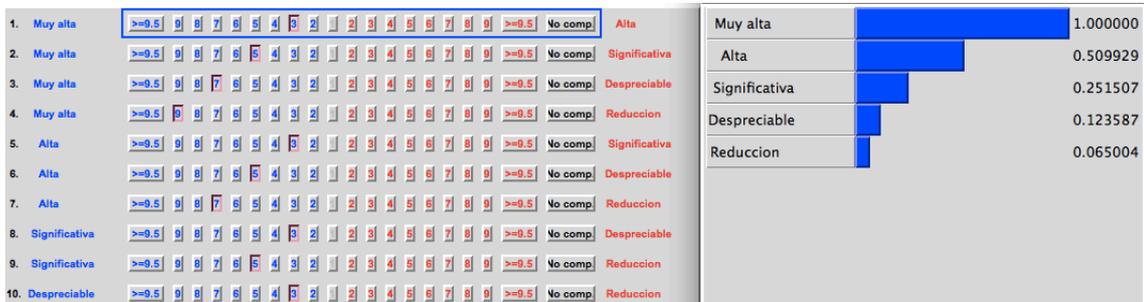


CET.C25 Mejora de la diagnosis del equipamiento.

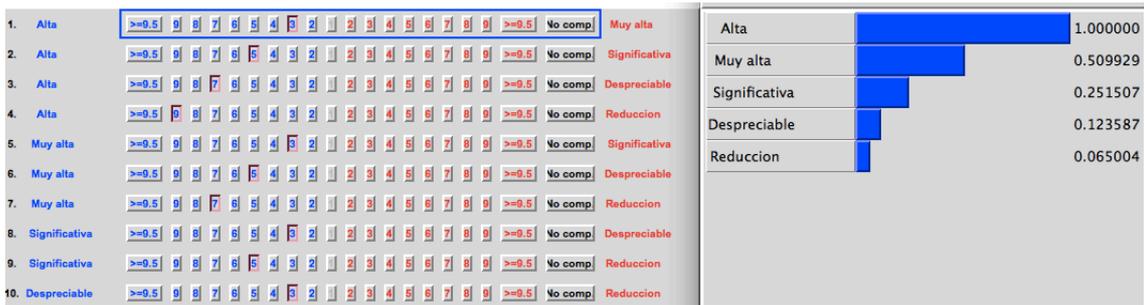


Grupo de criterios CUS. Criterios de Utilidad Social.

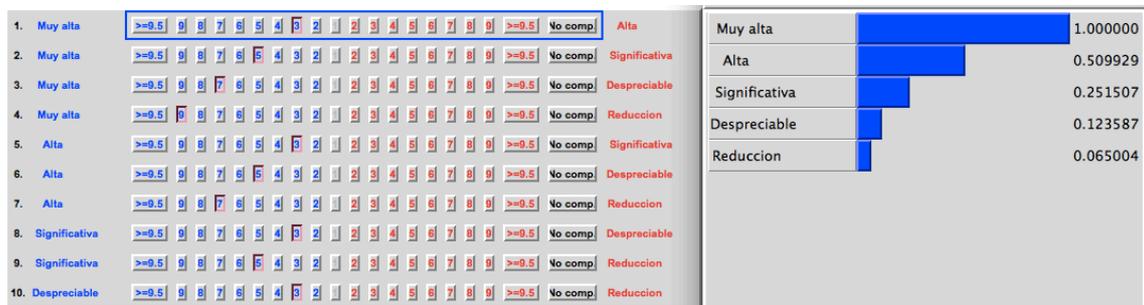
CUS.C26.- Mejora de las comunicaciones entre los municipios.



CUS.C10.- Mejora de la seguridad vial del entorno.



CUS.C27.- Mejora de la permeabilidad urbana.



Grupo de criterios CSA. Criterios de Sostenibilidad medioambiental

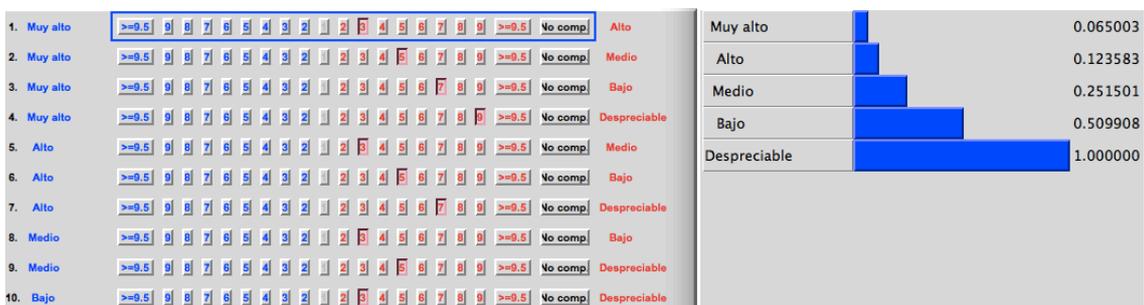
CSA.C29.- Reducción de los contaminación acústica.



CSA.C30.- Mejora de la eficiencia energética.



CSA.C31.- Reducción Impacto ambiental durante la actuación.



CSA.C32.- Reducción impacto ambiental FFCC.

1. Muy alto	>=0,5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=0,5	No comp	Alto
2. Muy alto	>=0,5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=0,5	No comp	Significativo
3. Muy alto	>=0,5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=0,5	No comp	Despreciable
4. Muy alto	>=0,5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=0,5	No comp	Aumento
5. Alto	>=0,5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=0,5	No comp	Significativo
6. Alto	>=0,5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=0,5	No comp	Despreciable
7. Alto	>=0,5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=0,5	No comp	Aumento
8. Significativo	>=0,5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=0,5	No comp	Despreciable
9. Significativo	>=0,5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=0,5	No comp	Aumento
10. Despreciable	>=0,5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=0,5	No comp	Aumento

Muy alto	1.000000
Alto	0.509929
Significativo	0.251507
Despreciable	0.123587
Aumento	0.065004

Grupo de criterios CTV. Criterio de Tramo de vía

CTV.C33 Criterio tramo de vía

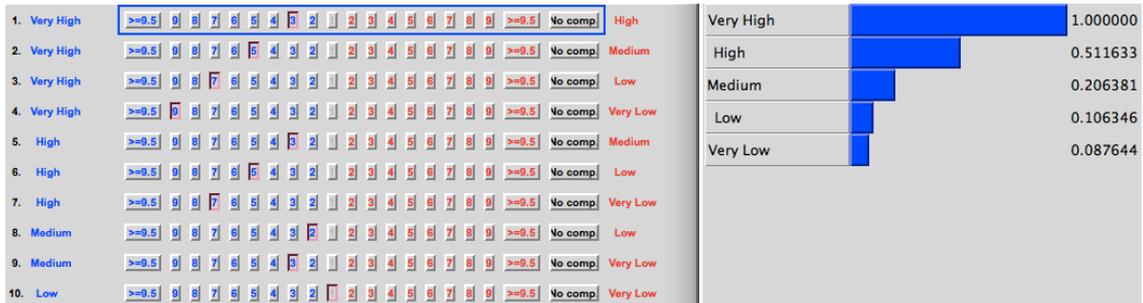
1. L troncal buenas prestaciones	>=0,5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=0,5	No comp	L troncal con PaN
2. L troncal buenas prestaciones	>=0,5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=0,5	No comp	L troncal via unica
3. L troncal buenas prestaciones	>=0,5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=0,5	No comp	L troncal alta incidencia
4. L troncal buenas prestaciones	>=0,5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=0,5	No comp	Lineas Secundarias
5. L troncal buenas prestaciones	>=0,5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=0,5	No comp	Ramales tecnicos
6. L troncal con PaN	>=0,5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=0,5	No comp	L troncal via unica
7. L troncal con PaN	>=0,5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=0,5	No comp	L troncal alta incidencia
8. L troncal con PaN	>=0,5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=0,5	No comp	Lineas Secundarias
9. L troncal con PaN	>=0,5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=0,5	No comp	Ramales tecnicos
10. L troncal via unica	>=0,5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=0,5	No comp	L troncal alta

L troncal buenas prestaciones	0.124669
L troncal con PaN	1.000000
L troncal via unica	0.317766
L troncal alta incidencia	0.525863
Lineas Secundarias	0.077800
Ramales tecnicos	0.031442

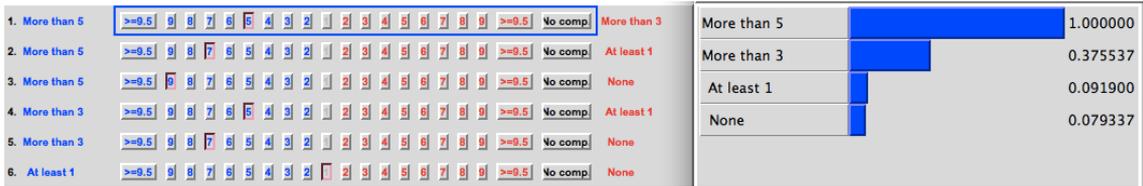
Crterios adicionales utilizados en el modelo ANP-BOCR

Grupo de criterios CTV Criterios de Tramo de vía

CTV.C11 kmtren/km



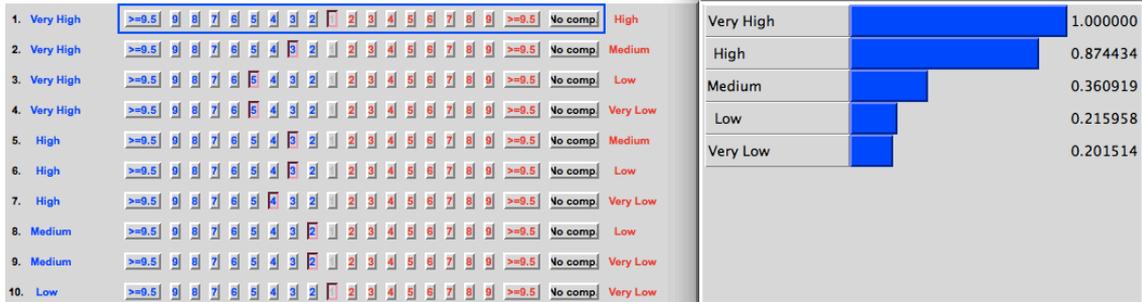
CTV.C12 PaN en la línea.



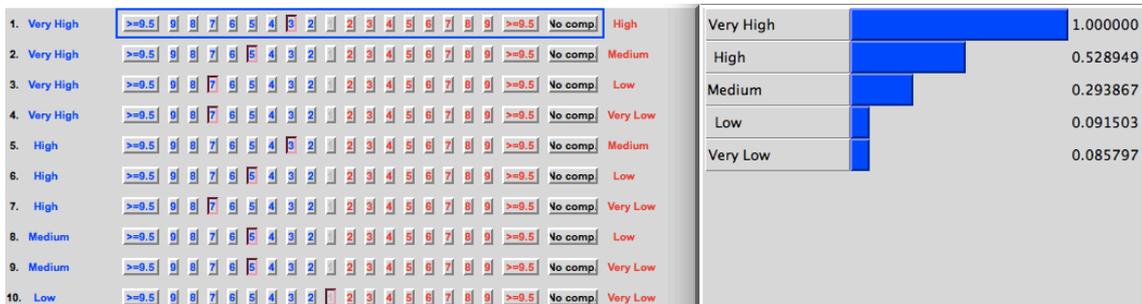
CTV.C13 Velocidad de la línea.



CML.C20.- Incidencias/km.

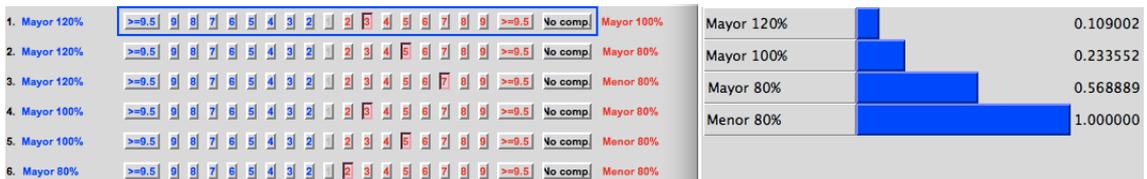


CTV.C21 Incidencias/kmtren.



Grupo de criterios CEE Criterios de eficiencia económica

CEE.C24.- Coste de Mantenimiento futuro.



Anexo 3. Cuestionario tipo de priorización de proyectos.

Se incluye a continuación un ejemplo de cuestionario utilizado para definir las relaciones en el modelo ANP.

Dentro del cuestionario de cada criterio se incluyen las preguntas para definir a qué criterios influye, y para definir que otros criterios le influyen. Es decir cada cuestionario abarca la fila y la columna del criterio a partir de la diagonal principal.

La información obtenida de estos cuestionarios se introduce en el modelo ANP de Superdecisions para obtener los resultados.

Obtención de la matriz de influencias:

Influencia del resto de criterios sobre el Criterio CSC.C1. Reducción de pasos a nivel.

En su opinión, en la determinación del Criterio CSC.C1. Reducción de pasos a nivel ¿puede influir el grupo de criterios CSE. Criterios de Eficiencia en la explotación. ?

SI NO

En caso afirmativo, indique con una cruz cuáles de los siguientes elementos de CSE. Criterios de Eficiencia en la explotación, afectan a CSC.C1. Reducción de pasos a nivel.

CSE.C5.-	Reducción de los tiempos de viaje.	<input type="checkbox"/>
CSE.C6.-	Reducción del cantón crítico.	<input type="checkbox"/>
CSE.C7.-	Mejora de los sistemas de explotación.	<input type="checkbox"/>

Influencia del criterio CSC.C1. Reducción de pasos a nivel sobre el resto de los criterios.

En su opinión, el criterio CSC.C1. Reducción de pasos a nivel ¿puede influir en CSE. Criterios de Eficiencia en la explotación?

SI NO

En caso afirmativo, indique con una cruz a cuáles de los siguientes elementos CSE. Criterios de Eficiencia en la explotación, afecta el plazo de ejecución de la obra.

CSE.C5.-	Reducción de los tiempos de viaje.	<input type="checkbox"/>
CSE.C6.-	Reducción del cantón crítico.	<input type="checkbox"/>
CSE.C7.-	Mejora de los sistemas de explotación.	<input type="checkbox"/>

Obtención de la matriz unweighted.

A continuación se incluyen un modelo del cuestionario utilizado para que los expertos ponderaran los criterios del modelo ANP-BOCR.

PRIMER NIVEL

Para escoger **la mejor actuación** ¿cuál de los siguientes criterios es el más importante o más determinante?

<input type="checkbox"/>	CSC.C1.- Reducción del numero de pasos a nivel.
<input type="checkbox"/>	CSC.C2.- Mejora de la señalización de pasos a nivel.
<input type="checkbox"/>	Son igual de importantes

En caso de haber uno más importante o más influyente, ¿cuánto más?

<input type="checkbox"/>	Entre igual de importantes y ligeramente preferido
<input type="checkbox"/>	Ligeramente más importante
<input type="checkbox"/>	Entre ligeramente y moderada
<input type="checkbox"/>	Tiene una importancia moderada frente al otro
<input type="checkbox"/>	Entre preferencia fuerte y moderada
<input type="checkbox"/>	Tiene una importancia claramente mayor
<input type="checkbox"/>	Existe una preferencia entre muy fuerte y fuerte
<input type="checkbox"/>	Tiene una importancia muy fuerte frente al otro
<input type="checkbox"/>	Entre preferencia extrema y muy fuerte
<input type="checkbox"/>	Extremadamente más importante

Influencias sobre CSC.C1. Reducción de pasos a nivel:

Para determinar el CSC.C1. Reducción de pasos a nivel , ¿cuál de los siguientes criterios es el más importante, el más influyente o el que más puede afectar?

<input type="checkbox"/>	CSE.C5.-Reducción de los tiempos de viaje.
<input type="checkbox"/>	CSE.C6.- Reducción del cantón crítico.
<input type="checkbox"/>	Son igual de importantes

En caso de haber uno más importante o más influyente, ¿cuánto más?

<input type="checkbox"/>	Entre igual de importantes y ligeramente preferido
<input type="checkbox"/>	Ligeramente más importante
<input type="checkbox"/>	Entre ligeramente y moderada
<input type="checkbox"/>	Tiene una importancia moderada frente al otro
<input type="checkbox"/>	Entre preferencia fuerte y moderada
<input type="checkbox"/>	Tiene una importancia claramente mayor
<input type="checkbox"/>	Existe una preferencia entre muy fuerte y fuerte
<input type="checkbox"/>	Tiene una importancia muy fuerte frente al otro
<input type="checkbox"/>	Entre preferencia extrema y muy fuerte
<input type="checkbox"/>	Extremadamente más importante

Obtención de la matriz weighted.

Para determinar el grupo de criterios CSC. Criterios de seguridad en la circulación, ¿cuál de los siguientes grupos de criterios es el más importante, el más influyente o el que más puede afectar?

<input type="checkbox"/>	CSE Criterios de eficiencia en la explotación.
<input type="checkbox"/>	CET Criterios de eficiencia técnica
<input type="checkbox"/>	Son igual de importantes

En caso de haber uno más importante o más influyente, ¿cuánto más?

<input type="checkbox"/>	Entre igual de importantes y ligeramente preferido
<input type="checkbox"/>	Ligeramente más importante
<input type="checkbox"/>	Entre ligeramente y moderada
<input type="checkbox"/>	Tiene una importancia moderada frente al otro
<input type="checkbox"/>	Entre preferencia fuerte y moderada
<input type="checkbox"/>	Tiene una importancia claramente mayor
<input type="checkbox"/>	Existe una preferencia entre muy fuerte y fuerte
<input type="checkbox"/>	Tiene una importancia muy fuerte frente al otro
<input type="checkbox"/>	Entre preferencia extrema y muy fuerte
<input type="checkbox"/>	Extremadamente más importante

Anexo 4. Selección de proyectos para análisis de sensibilidad.

id	nombre	coste	linea	CSC.C1	CSC.C2	CSC.C3	CSC.C4	CSE.C5	CSE.C6	CSE.C7	CET.C8	CET.C9	CJS.C10	CTV.C11	CTV.C12	CTV.C13	CTV.C14	CMJ.C15	CMC.C16	CEE.C17	CML.C18	CML.C19	CML.C20	CTV.C21	CEE.C22	CEE.C23	CEE.C24	CVP.C25	CVP.C26
36	30802X	Supresion de Pan	9,00E+05	BIVALLADA - BIFL ALCUDIA	Parcial	Despreciable	Indiferente	Despreciable	Menor 1%	Menor 1%	Despreciable	Mayor 5%	Mayor 5%	Medio	Mas de 3	Mayor de 140 BAB/BAU	Menor 10%	Mayor 10%	Despreciable	Muy baja	Muy baja	Muy baja	Muy baja	Muy baja	Menor 3ME	Mayor 100%	Mayor 80%	Menor 20%	Menor 10%
45	308501	Acordicionado Catemara CR220 y Renovacion de Hilo contacto	1270000	JATVA - SILLA	Indiferente	Despreciable	Indiferente	Despreciable	Menor 1%	Menor 1%	Despreciable	Mayor 5%	Mayor 10%	Despreciable	Alta	Al menos 1	Mayor de 160 BAD	Menor 10%	Mayor 10%	Significativa	Muy baja	Muy baja	Baja	Muy baja	Mayor 20ME	Mayor 100%	Mayor 80%	Menor 20%	Menor 10%
46	308502	Acordicionado Catemara CR160 y Renovacion de Hilo de contacto	2850000	JATVA - SILLA	Indiferente	Despreciable	Indiferente	Despreciable	Menor 1%	Menor 1%	Despreciable	Mayor 5%	Mayor 10%	Despreciable	Alta	Al menos 1	Mayor de 160 BAD	Menor 10%	Mayor 10%	Significativa	Muy baja	Muy baja	Baja	Muy baja	Mayor 20ME	Mayor 100%	Mayor 80%	Menor 20%	Menor 10%
51	308503	Substitucion Bloqueo electrico por electronico	5,00E+05	JATVA - SILLA	Indiferente	Despreciable	Parcial	Alta	Menor 1%	Menor 1%	Despreciable	Mayor 10%	Mayor 10%	Despreciable	Alta	Al menos 1	Mayor de 160 BAD	Menor 10%	Mayor 10%	Despreciable	Muy baja	Muy baja	Baja	Muy baja	Mayor 3ME	Mayor 100%	Mayor 80%	Menor 20%	Menor 10%
53	30850R	Cambio de BAD por BAB	4,00E+06	JATVA - SILLA	Indiferente	Despreciable	Significativa	Significativa	Menor 1%	Menor 1%	Significativa	Reduccion	Mayor 5%	Despreciable	Medio	Al menos 1	Mayor de 160 BAD	Menor 10%	Aumento 10%	Despreciable	Muy baja	Muy baja	Baja	Muy baja	Mayor 3ME	Mayor 80%	Mayor 100%	Menor 20%	Menor 10%
147	31050B	Renovacion Via UIC 54 y travesia RS	4,2e+07	ALMENARA - CASTELLON DE LA PLANA	Indiferente	Despreciable	Indiferente	Despreciable	Menor 1%	Menor 1%	Despreciable	Mayor 5%	Menor 5%	Despreciable	Medio	Al menos 1	Mayor de 160 BAD	Menor 10%	Mayor 25%	Despreciable	Baja	Muy baja	Medio	Muy baja	Mayor 3ME	Mayor 100%	Mayor 100%	Menor 20%	Menor 10%
160	31050X	Supresion de PAN	9,00E+05	ALMENARA - CASTELLON DE LA PLANA	Total	Despreciable	Indiferente	Despreciable	Menor 1%	Menor 1%	Despreciable	Mayor 20%	Mayor 5%	Muy alta	Medio	Al menos 1	Mayor de 160 BAD	Menor 10%	Mayor 25%	Despreciable	Baja	Muy baja	Medio	Muy baja	Mayor 3ME	Mayor 100%	Mayor 80%	Menor 20%	Menor 10%
197	31200H	Tratamiento de Infraestructura	1500000	VINAROS - ULLDECONA	Indiferente	Despreciable	Indiferente	Despreciable	Mayor 5%	Mayor 5%	Despreciable	Menor 1%	Menor 5%	Despreciable	Baja	Ninguno	Mayor de 200 BAB/BAU	Menor 10%	Menor 1%	Muy alta	Baja	Muy baja	Medio	Muy baja	Mayor 3ME	Mayor 100%	Mayor 100%	Menor 20%	Menor 10%
209	31250M	Construccion de Subestacion Adicional	3500000	ULLDECONA - L ALDEA AMPOSTA	Indiferente	Despreciable	Indiferente	Despreciable	Menor 1%	Menor 1%	Despreciable	Menor 1%	Menor 5%	Despreciable	Baja	Ninguno	Mayor de 200 BAB/BAU	Menor 10%	Aumento 10%	Alta	Baja	Muy baja	Baja	Muy baja	Mayor 3ME	Mayor 100%	Mayor 120%	Mayor 20%	Mayor 10%
232	31300D	Conversion Via Unica a Bobbe (solo Infra e Via)	4,6e+07	L ALDEA AMPOSTA - SALDU	Indiferente	Despreciable	Indiferente	Despreciable	Menor 1%	Menor 1%	Despreciable	Reduccion	Menor 5%	Despreciable	Baja	Mas de 5	Mayor de 160 BAB/BAU	Menor 10%	Aumento 20%	Alta	Baja	Muy baja	Medio	Muy baja	Mayor 20ME	Mayor 100%	Mayor 150%	Mayor 20%	Mayor 10%
241	31300H	Substitucion Enclavamientos por electronicos y CV Audiofrecuenc	1,00E+06	L ALDEA AMPOSTA - SALDU	Parcial	Despreciable	Indiferente	Despreciable	Menor 1%	Menor 1%	Despreciable	Mayor 10%	Mayor 20%	Alta	Baja	Mas de 5	Mayor de 160 BAB/BAU	Menor 10%	Mayor 10%	Significativa	Baja	Muy baja	Medio	Muy baja	Mayor 3ME	Mayor 100%	Mayor 80%	Menor 20%	Mayor 10%
245	31300X	Supresion de Pan	950000	L ALDEA AMPOSTA - SALDU	Parcial	Despreciable	Indiferente	Despreciable	Menor 1%	Menor 1%	Despreciable	Mayor 20%	Mayor 5%	Alta	Baja	Mas de 5	Mayor de 160 BAB/BAU	Menor 10%	Mayor 25%	Despreciable	Baja	Muy baja	Medio	Muy baja	Mayor 3ME	Mayor 100%	Mayor 80%	Menor 20%	Menor 10%
262	32150Y	Montaje de Tren tierra	650000	CAMPORIBLES - UTIEL	Indiferente	Despreciable	Significativa	Despreciable	Menor 1%	Menor 1%	Significativa	Reduccion	Mayor 5%	Despreciable	Muy baja	Al menos 1	Mayor de 140 Ninguno	Menor 10%	Menor 1%	Despreciable	Muy baja	Muy baja	Baja	Muy baja	Mayor 3ME	Mayor 100%	Mayor 100%	Menor 20%	Menor 10%
277	32300U	Cambio de BT por BAD	1800000	UTIEL - BULLOL	Indiferente	Significativa	Significativa	Muy alta	Menor 1%	Mayor 20%	Muy alta	Reduccion	Mayor 10%	Despreciable	Baja	Mas de 5	Mayor de 140 Ninguno	Mayor 10%	Aumento 20%	Significativa	Muy baja	Muy baja	Medio	Muy baja	Mayor 3ME	Mayor 60%	Mayor 150%	Mayor 20%	Mayor 10%
278	32300V	Cambio de BT por BAB	2300000	UTIEL - BULLOL	Indiferente	Significativa	Significativa	Muy alta	Menor 1%	Mayor 20%	Muy alta	Reduccion	Mayor 10%	Despreciable	Baja	Mas de 5	Mayor de 140 Ninguno	Mayor 10%	Aumento 20%	Significativa	Muy baja	Muy baja	Medio	Muy baja	Mayor 3ME	Mayor 60%	Mayor 150%	Mayor 20%	Mayor 10%
281	32350A	Renovacion Via UIC 60 y travesia Hormigon	1570000	BUNOL - VARA DE QUART	Indiferente	Despreciable	Indiferente	Despreciable	Menor 1%	Menor 1%	Despreciable	Mayor 10%	Mayor 5%	Despreciable	Medio	Ninguno	Mayor de 140 BAB/BAU	Menor 10%	Mayor 25%	Alta	Baja	Muy baja	Alta	Muy baja	Mayor 10ME	Mayor 100%	Mayor 80%	Mayor 20%	Mayor 10%
286	32350G	Substitucion Desvios tipo A por C	3100000	BUNOL - VARA DE QUART	Parcial	Despreciable	Indiferente	Despreciable	Mayor 5%	Mayor 5%	Significativa	Mayor 5%	Mayor 5%	Despreciable	Medio	Ninguno	Mayor de 140 BAB/BAU	Mayor 20%	Mayor 10%	Significativa	Baja	Muy baja	Alta	Muy baja	Mayor 3ME	Mayor 100%	Mayor 80%	Menor 20%	Menor 10%
294	32350X	Supresion de Pan	950000	BUNOL - VARA DE QUART	Parcial	Despreciable	Indiferente	Despreciable	Menor 1%	Menor 1%	Despreciable	Mayor 10%	Mayor 10%	Muy alta	Medio	Ninguno	Mayor de 140 BAB/BAU	Menor 10%	Mayor 10%	Despreciable	Baja	Muy baja	Alta	Muy baja	Mayor 3ME	Mayor 100%	Mayor 80%	Menor 20%	Menor 10%
332	33650H	Tratamiento de Infraestructura	2,00E+06	ONTNIENTE - ALCOY	Indiferente	Despreciable	Indiferente	Despreciable	Menor 1%	Menor 1%	Despreciable	Menor 1%	Mayor 5%	Despreciable	Muy baja	Ninguno	Menor de 100 Ninguno	Menor 10%	Mayor 10%	Muy alta	Muy baja	Muy baja	Muy baja	Muy baja	Mayor 3ME	Mayor 100%	Mayor 100%	Menor 20%	Menor 10%
344	33800D	Conversion Via Unica a Bobbe (solo Infra e Via)	3,2e+07	SILLA - GANDIA	Indiferente	Despreciable	Indiferente	Despreciable	Menor 1%	Menor 1%	Despreciable	Reduccion	Menor 5%	Despreciable	Medio	Mas de 5	Mayor de 140 BAD	Menor 10%	Aumento 20%	Muy alta	Baja	Muy baja	Alta	Muy baja	Mayor 20ME	Mayor 100%	Mayor 150%	Mayor 20%	Mayor 10%
350	33800K	Montaje de control distribuido en subestaciones	4,00E+05	SILLA - GANDIA	Indiferente	Despreciable	Indiferente	Despreciable	Menor 1%	Menor 1%	Despreciable	Mayor 5%	Menor 5%	Despreciable	Medio	Mas de 5	Mayor de 140 BAD	Menor 10%	Menor 1%	Despreciable	Baja	Muy baja	Alta	Muy baja	Mayor 3ME	Mayor 80%	Mayor 80%	Menor 20%	Menor 10%
355	33800P	Construccion Pl Bloqueo intermedios y reduccion canton critico	1,00E+06	SILLA - GANDIA	Indiferente	Despreciable	Parcial	Muy alta	Menor 1%	Mayor 20%	Significativa	Reduccion	Mayor 10%	Despreciable	Medio	Mas de 5	Mayor de 140 BAD	Mayor 20%	Aumento 10%	Significativa	Baja	Muy baja	Alta	Muy baja	Mayor 3ME	Mayor 100%	Mayor 120%	Mayor 50%	Mayor 25%
365	33801H	Tratamiento de Infraestructura	7,00E+05	GANDIA MERCANCIAS - GANDIA PUERTO	Indiferente	Despreciable	Indiferente	Despreciable	Menor 1%	Menor 1%	Despreciable	Menor 1%	Menor 5%	Despreciable	Muy baja	Al menos 1	Mayor de 140 BAB/BAU	Menor 10%	Menor 1%	Muy alta	Muy alta	Medio	Medio	Mayor 3ME	Mayor 100%	Mayor 100%	Menor 20%	Menor 10%	
369	33801L	Montaje de telemando de Seccionadores	1000	GANDIA MERCANCIAS - GANDIA PUERTO	Indiferente	Despreciable	Indiferente	Despreciable	Menor 1%	Menor 1%	Despreciable	Menor 1%	Menor 5%	Despreciable	Muy baja	Al menos 1	Mayor de 140 BAB/BAU	Menor 10%	Menor 1%	Despreciable	Muy alta	Muy alta	Alta	Medio	Mayor 3ME	Mayor 100%	Mayor 100%	Menor 20%	Menor 10%

Anexo 5. Proyectos considerados y peso en modelo
ANP-BOCR.

Código de proyecto	Valoración	Orden
31300I	1	1
31300X	0.881956691404027	2
32300X	0.835400980941828	3
31300A	0.807206828358781	4
32300S	0.790789562242253	5
31300J	0.786770374119963	6
32300G	0.774673140825513	7
33800I	0.76796564340983	8
32300T	0.767110036466665	9
31300N	0.761679392675448	10
32300U	0.759275702390228	11
32300V	0.759275702390228	12
32300N	0.719145798500893	13
31300O	0.712536938064669	14
31300C	0.707159149141883	15
32300A	0.702881636843449	16
32300C	0.697368395640226	17
31300K	0.670859222563599	18
32300B	0.658658519737891	19
31300L	0.657835754678438	20
31300B	0.641443179493674	21
31300P	0.603430098045521	22
32300E	0.600720230940411	23
33800X	0.565058209983493	24
32300D	0.559479208166018	25
33800G	0.554817929440037	26
33800J	0.549224929560125	27
32300H	0.534867249390948	28
31101S	0.531520901479002	29
31101T	0.531520901479002	30
33800A	0.52053995662394	31
30851S	0.517351804457512	32
30851T	0.517351804457512	33
33800L	0.513179861010956	34
33800K	0.513147947676632	35
33800C	0.511340593511801	36
33800N	0.508842150051017	37
30957T	0.507794361268123	38
30957U	0.507794361268123	39
33800O	0.500391020822778	40
31251O	0.486429543434024	41
33800R	0.479894216877912	42
30957S	0.475946606715197	43
32300I	0.474640332509964	44
32300J	0.474640332509964	45
32150S	0.471379498931897	46
32150T	0.471379498931897	47
33800B	0.463776978232942	48

Código de proyecto	Valoración	Orden
31251X	0.454128548581607	49
31300H	0.446251032768938	50
31300D	0.446009187440674	51
31101N	0.421317366893149	52
33600T	0.420031464972158	53
33600U	0.420031464972158	54
33600V	0.420031464972158	55
33650T	0.416358490913939	56
33650U	0.416358490913939	57
33650V	0.416358490913939	58
33800P	0.415296207769208	59
33600S	0.415071768927462	60
30851Y	0.413022212864438	61
33650S	0.411427343628631	62
31300G	0.408126043297667	63
31251N	0.403987900206561	64
31251G	0.383590229541088	65
33801Y	0.381769606293469	66
32150G	0.374672782698185	67
33800H	0.372843765706451	68
31251I	0.367718867759505	69
33801O	0.367047589209125	70
33800E	0.366120814057412	71
33801N	0.364223959738432	72
30800I	0.363262973855913	73
33801R	0.362036845527661	74
33800D	0.361261398644324	75
30800J	0.357648764062526	76
32300M	0.351247823244281	77
32150N	0.350405260020131	78
33801X	0.35022144718643	79
31251J	0.34695507629477	80
22400Q	0.334885438647404	81
32150Y	0.332490518808094	82
31251L	0.332289150426571	83
31300R	0.325788848221197	84
30802X	0.32383649258922	85
30957Y	0.318893420893861	86
33801G	0.3131209970562	87
31101A	0.312294268245364	88
31000N	0.309811435214631	89
31101C	0.308912508667824	90
31101L	0.30565941444146	91
30957N	0.30560082464324	92
30851N	0.298355915528116	93
31101G	0.296831373611651	94
33801I	0.296020500501056	95
30951I	0.295445189476283	96
30957V	0.295315960757603	97
34200N	0.294206559939843	98

Código de proyecto	Valoración	Orden
31101B	0.292698491227409	99
32150P	0.289802216386851	100
31101I	0.289312623255388	101
30802O	0.289219827258034	102
30957I	0.287132712833553	103
30802G	0.286089289042749	104
33600P	0.28576214329694	105
30802N	0.284276083553715	106
22450X	0.281588376135904	107
32150E	0.281562616027193	108
33650P	0.2809826715049	109
30957L	0.279743789913068	110
30951J	0.277865587551573	111
31300E	0.277554789637566	112
30851G	0.276443608161301	113
33801K	0.276295298348095	114
33801L	0.276295298348095	115
33801J	0.276295222993375	116
30957J	0.274390782312223	117
31101J	0.27414292270143	118
33600Y	0.270808818315062	119
33600G	0.26839291538753	120
22400N	0.265865227800877	121
33600N	0.263722587682722	122
31150I	0.263317457304	123
33650N	0.261762335658701	124
33650Y	0.260745640152444	125
30851L	0.258762586596193	126
30950I	0.258212324312908	127
33600X	0.25820473070484	128
31251E	0.257485750065607	129
33650G	0.254971385592239	130
31101P	0.253265022432991	131
33600A	0.251477530680407	132
33600C	0.249247153274919	133
32150A	0.247570508456162	134
33650A	0.247404316385459	135
33650C	0.245202730971318	136
32150C	0.245059773479651	137
31050X	0.244382413311494	138
33801E	0.240388334032875	139
30851I	0.2386611920387	140
22400A	0.238546421811759	141
22400C	0.238546421811759	142
30802K	0.236483352264511	143
30802L	0.236483352264511	144
32150H	0.233536387644615	145
30953I	0.232369270117758	146
30951H	0.231967988761854	147
31050I	0.228106577949486	148

Código de proyecto	Valoración	Orden
32150B	0.227088641900553	149
31101E	0.226487971006927	150
33801H	0.226058869133889	151
22500X	0.225819513932156	152
33801A	0.225646629556304	153
31101D	0.225184861477686	154
30851J	0.224460355807945	155
33801C	0.223528638856344	156
30951A	0.221911985753872	157
30951C	0.221911985753872	158
22400B	0.221803024474789	159
30851F	0.221758320399073	160
30851P	0.220933828975412	161
30957P	0.220864117581493	162
34200Q	0.220786065143751	163
30802A	0.219334676258372	164
30802Q	0.219158847747137	165
30953J	0.218542816299211	166
31251H	0.217956087701665	167
31100I	0.215807413603904	168
30953Y	0.215343071539005	169
30957A	0.214415991688398	170
33801P	0.214408887564695	171
30802P	0.213932776409479	172
33600H	0.213609248116566	173
34200A	0.213489553097113	174
30902L	0.21332630694258	175
30957H	0.212765365536996	176
31101H	0.212517987935674	177
30957C	0.21209680281885	178
33600B	0.211901659844198	179
33801B	0.21069922094892	180
34250X	0.209553516991724	181
33650B	0.208284617441719	182
30800K	0.207565844666107	183
30800L	0.207565844666107	184
30951B	0.207220372934691	185
22450N	0.206975246485446	186
33650H	0.206921275429195	187
30950J	0.204374292825081	188
34200P	0.203932395734519	189
33600E	0.203895895962256	190
31200I	0.203733699312336	191
30957B	0.202880038221116	192
30802I	0.200923479101568	193
30851E	0.199528899234306	194
22550N	0.198636807345517	195
31250I	0.197865604351557	196
33650E	0.196922598049082	197
31251P	0.196749344322929	198

Código de proyecto	Valoración	Orden
22450H	0.196135689740851	199
22450Q	0.195683624757749	200
33800M	0.194191817015456	201
34250N	0.192254182988525	202
30800A	0.191894086383937	203
30950N	0.191615268412901	204
32150L	0.190612182602952	205
30802J	0.188901375057237	206
34200H	0.187335792811355	207
22450P	0.18600183540827	208
31050N	0.185614137178344	209
31100K	0.183390324522294	210
34200C	0.181177544545129	211
22400I	0.179998307906239	212
22400J	0.179998307906239	213
22400P	0.179477178382789	214
31101Y	0.179401344039689	215
31100A	0.178881770687603	216
31050G	0.178591227511401	217
30902I	0.178339590852848	218
30902J	0.178339590852848	219
31100L	0.177805859332283	220
31300M	0.177788743778932	221
22500N	0.177788141482785	222
30851H	0.176884499453465	223
30802C	0.17605671592917	224
30851A	0.175760653426699	225
31200K	0.175654386227649	226
31100C	0.175004530987421	227
22450A	0.174846843633868	228
22450C	0.174846843633868	229
30802E	0.174522784116428	230
22400D	0.17430114524528	231
22500A	0.173875530678461	232
22500C	0.173875530678461	233
30851C	0.173702536381549	234
33600D	0.173299088265894	235
31250K	0.17059505598344	236
33650D	0.17043436378043	237
31251R	0.17017412754068	238
31200L	0.170102693677914	239
31150L	0.169836550471146	240
31050J	0.168716879586569	241
34200B	0.167799021221509	242
22500Q	0.167767270716216	243
31200A	0.167663691750191	244
31150A	0.167276108821803	245
31150K	0.167174149906946	246
31250L	0.165064796853133	247
22500B	0.164461641268147	248

Código de proyecto	Valoración	Orden
22550Q	0.164332215747181	249
32350X	0.164276011964971	250
30957D	0.163951116651929	251
30851B	0.163714937183063	252
30802B	0.16348455263244	253
22450B	0.163251676785141	254
30953H	0.16323993339678	255
32150D	0.162199634063069	256
30953A	0.16143053701	257
30953C	0.16143053701	258
31100B	0.160623205534035	259
31250A	0.160327029552504	260
34250Q	0.159681504780728	261
33801D	0.158289345964252	262
22500P	0.157410058877979	263
32350N	0.15704174787579	264
31000K	0.155511208972509	265
31000L	0.155511208972509	266
31000P	0.154790896878637	267
30953B	0.152148556817663	268
22500I	0.151893259978391	269
22500J	0.151893259978391	270
31050K	0.151776899972591	271
34250P	0.151269049880667	272
30750K	0.148810942493672	273
30902D	0.148595553578468	274
34200D	0.148581444919394	275
31050E	0.14811682305064	276
31050L	0.147647226070512	277
30750L	0.14651698210136	278
30750P	0.145023383366734	279
34250A	0.144639233507829	280
31150P	0.143671202822234	281
30800P	0.142828786287445	282
31050A	0.141290193491875	283
30902H	0.141007278746613	284
30950K	0.140382571597593	285
30802D	0.139853282480872	286
30850X	0.139392298042495	287
30902C	0.139084223239065	288
22550P	0.138642271465488	289
31050C	0.138602967205483	290
22400M	0.137222151043935	291
31251D	0.136313942384814	292
30950A	0.136155743234812	293
30850I	0.135938941393343	294
30750I	0.135166107553411	295
22450D	0.134160649400747	296
30800R	0.133144073589051	297
32350P	0.132287882882075	298

Código de proyecto	Valoración	Orden
30802H	0.131913196832636	299
22500H	0.131232222400363	300
30802M	0.130318637392814	301
31050B	0.130013516149245	302
31050P	0.129403661249955	303
30850J	0.128769703933005	304
32350A	0.127879300372492	305
32150I	0.127838789730671	306
32150J	0.127838789730671	307
30850O	0.126271767881079	308
30850N	0.12627171546394	309
34250I	0.125348821496831	310
34250J	0.125348821496831	311
31200P	0.125216709181046	312
34250H	0.12463092439791	313
22550H	0.124626485129489	314
31251A	0.123770215049796	315
31251C	0.123770215049796	316
31251M	0.121686452061196	317
31250P	0.121412901191089	318
22500D	0.120773394805909	319
31100P	0.120199687410501	320
22550A	0.11875989865275	321
22550C	0.11875989865275	322
22500M	0.118382879710877	323
32350C	0.118042132601015	324
22550D	0.117754105200451	325
31251B	0.117299600537804	326
32150M	0.116816228963885	327
34250C	0.116347002211648	328
34250D	0.11548348710055	329
31000A	0.113351760412438	330
30851D	0.111717262894193	331
31000C	0.111104088652759	332
32350B	0.109698176378171	333
34200I	0.106974606246965	334
34200J	0.106974606246965	335
22450R	0.106028396589236	336
34250B	0.106026593239515	337
30750A	0.103747007584045	338
22500R	0.103325900658896	339
30900X	0.103225048464825	340
30850K	0.102500814386582	341
22550R	0.101170449689057	342
30850L	0.0991477052388257	343
31100H	0.0991091537664995	344
30800H	0.0978849489751231	345
31050R	0.0978429243943403	346
34250M	0.096816713574843	347
31200H	0.0940123658453097	348

Código de proyecto	Valoración	Orden
31000H	0.0932379589054412	349
30850P	0.0903413424656997	350
31250H	0.0895015648552926	351
30850A	0.0865264702559393	352
30850C	0.0865264702559393	353
34200M	0.0856716879923114	354
32350E	0.0853558922591979	355
22400H	0.0828234846883572	356
31000I	0.0805916882259966	357
30850B	0.0803705772585155	358
22450M	0.0802790216853215	359
22550M	0.0796206533811487	360
22550I	0.078995267269515	361
22550J	0.078995267269515	362
22450I	0.078960476058825	363
22450J	0.078960476058825	364
32350I	0.0778350636797464	365
32350H	0.0771018903017817	366
30902A	0.076296872498583	367
32350G	0.0753110839014869	368
30850R	0.0752981404901538	369
32350D	0.0740736470644726	370
30850E	0.0725745716020806	371
32500N	0.0713846451720817	372
32500R	0.0698512437729595	373
22550B	0.0679992137271787	374
32350R	0.0670823332827336	375
32500G	0.0649598346263725	376
30900L	0.0647712428599339	377
30850G	0.064671151052115	378
30950L	0.0644296107373932	379
30900K	0.0638144023294402	380
32500P	0.059220861053725	381
30900I	0.0567242428335778	382
31050H	0.0548768574362536	383
30900J	0.0546614252923729	384
32350M	0.053348662943902	385
30900P	0.0521999133423016	386
32350J	0.0473497454474799	387
32500I	0.0472018339516978	388
32500J	0.0472018339516978	389
30850F	0.0460795308665906	390
30900A	0.0442597193580118	391
30900C	0.0442597193580118	392
30800M	0.0441801201682668	393
32500A	0.0429605820041189	394
32500C	0.0429605820041189	395
32500E	0.0428752262069113	396
30950H	0.042716169269172	397
30900B	0.0414028350670362	398

Código de proyecto	Valoración	Orden
30900G	0.0407770640101427	399
32500B	0.0406333942260463	400
32500H	0.0400086131863925	401
31150H	0.0392865717264807	402
30900E	0.0367733854810375	403
30750H	0.0361191526668653	404
31050M	0.0359596748785269	405
30750M	0.0356070471160028	406
30850H	0.0349295053070756	407
30900H	0.0347616990467233	408
32500D	0.0333447458163063	409
31100M	0.0331110528507727	410
31000M	0.0320306304775197	411
32500M	0.0317285571197131	412
31200M	0.0308153605898495	413
31150M	0.030736043805479	414
30850M	0.0302796787707636	415
31250M	0.0293139517018136	416
30950M	0.0270283789259048	417
30900F	0.0247014190761864	418
30900M	0.0172801354286502	419

Anexo 6. Matriz de incompatibilidades entre tipos de proyectos.

