



UNIVERSIDAD DE JAÉN  
*Centro de Estudios de Postgrado*

Trabajo Fin de Máster

# **ESTUDIO COMPARATIVO DE MODELOS DE TOMA DE DECISIÓN MULTICRITERIO PARA LA SELECCIÓN DEL TRAZADO DE UNA VÍA**

**Alumno/a: Tejero Aranda, María del Carmen**

Tutor/a: Prof. Dra. Macarena Espinilla Estévez  
Dpto. Informática

**Julio, 2015**



**UNIVERSIDAD DE JAÉN**  
*Centro de Estudios de Postgrado*

Trabajo Fin de Máster

**ESTUDIO COMPARATIVO DE  
MODELOS DE TOMA DE DECISIÓN  
MULTICRITERIO PARA LA  
SELECCIÓN DEL TRAZADO DE UNA  
VÍA**

**Autor/a: Tejero Aranda, María del Carmen**

# ÍNDICE GENERAL

|  |           |
|--|-----------|
| <b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....</b>  | <b>8</b>  |
| 1.1. Introducción del problema.....  | 8         |
| 1.2. Propuesta .....   | 11        |
| 1.3. Objetivos .....   | 11        |
| 1.4. Estructura del trabajo fin de máster .....  | 12        |
| <br>   |           |
| <b>CAPÍTULO 2. TOMA DE DECISIÓN EN EL PROBLEMA DE SELECCIÓN DEL TRAZADO<br/>DE UNA VÍA .....</b> | <b>14</b> |
| 2.1. Toma de decisión .....  | 15        |
| 2.2. Clasificación de los problemas de toma de decisiones.....                                   | 15        |
| 2.3. Análisis de decisión para la selección del trazado de una vía .....                         | 21        |
| 2.4. Proyecto de selección del trazado de una vía .....  | 24        |

**CAPÍTULO 3. MÉTODOS DE TOMA DE DECISIÓN MULTICRITERIO. TOPSIS Y AHP .. 27**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>3.1. Métodos de toma de decisión multicriterio .....</b>        | <b>27</b> |
| <b>3.2. El proceso analítico jerárquico (AHP).....</b>             | <b>30</b> |
| <b>3.3. Método TOPSIS. Selección de la mejor alternativa .....</b> | <b>40</b> |

**CAPÍTULO 4. CASO DE ESTUDIO PARA LA SELECCIÓN DE UN TRAZADO DE UNA VÍA MEDIANTE MÉTODOS DE TDMC ..... 46**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>4.1. Proyecto del trazado de una vía.....</b>                             | <b>46</b> |
| <b>4.2. Cálculo del peso de los criterios por medio de AHP .....</b>         | <b>53</b> |
| 4.2.1. Descripción de los criterios.....                                     | 54        |
| 4.2.2. Evaluación de la relevancia de los criterios .....                    | 54        |
| <b>4.3. Selección del trazado de una vía. Selección de alternativas.....</b> | <b>58</b> |
| 4.3.1. Selección del trazado de una vía. AHP .....                           | 60        |
| 4.3.1.1. Recogida de la información .....                                    | 60        |
| 4.3.1.2. Resolución del problema a través del método AHP.....                | 66        |
| 4.3.2. Selección del trazado de una vía. TOPSIS.....                         | 69        |
| 4.3.2.1. Valoración de las alternativas .....                                | 69        |
| 4.3.2.2. Resolución del problema a través del método TOPSIS .....            | 69        |
| 4.3.3. Comparativa con otros métodos de toma de decisión multicriterio.....  | 74        |
| <b>4.4. Discusión de los resultados .....</b>                                | <b>76</b> |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO.....</b> | <b>79</b> |
| <b>5.1. Líneas futuras de trabajo .....</b>                      | <b>81</b> |
| <b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>  | <b>82</b> |

## ÍNDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1.-Esquema general de un problema de toma de decisión con un único criterio .....            | 16 |
| Tabla 2.-Esquema general de un problema de toma de decisión multicriterio .....                    | 17 |
| Tabla 3.-Esquema general de un problema de toma de decisión con un solo experto y un solo criterio | 19 |
| Tabla 4.-Esquema general de un problema de toma de decisión multiexperto con un solo criterio..... | 20 |
| Tabla 5.-Esquema general de un problema de toma de decisión multicriterio multiexperto.....        | 20 |
| Tabla 6.-Escala fundamental de comparación .....   | 35 |
| Tabla 7.-Valores del índice de consistencia aleatorio (RI) para pequeños problemas.....            | 38 |
| Tabla 8.-Matriz de decisión .....  | 43 |
| Tabla 9.-Matriz de comparación por pares. Criterios .....  | 55 |
| Tabla 10.-Análisis de consistencia de los criterios .....  | 57 |
| Tabla 11.-Matriz normalizada. Criterios .....  | 58 |
| Tabla 12.-Vector de pesos. Criterios.....  | 58 |
| Tabla 13.-Matriz de comparación por pares. Criterio: funcionalidad .....                           | 61 |
| Tabla 14.-Análisis de consistencia criterio: funcionalidad .....                                   | 61 |
| Tabla 15.-Matriz de comparación por pares. Criterio: planeamiento urbanístico .....                | 62 |

ESTUDIO COMPARATIVO DE MODELOS DE TOMA DE DECISIÓN MULTICRITERIO PARA LA SELECCIÓN DEL TRAZADO DE UNA VÍA

|  |    |
|--|----|
| Tabla 16.-Análisis de consistencia criterio: planeamiento urbanístico .....  | 62 |
| Tabla 17.-Matriz de comparación por pares. Criterio: impacto ambiental ..... | 63 |
| Tabla 18.-Análisis de consistencia criterio: impacto ambiental .....         | 64 |
| Tabla 19.-Matriz de comparación por pares. Criterio: geotecnia.....          | 64 |
| Tabla 20.-Análisis de consistencia criterio: geotecnia.....                  | 65 |
| Tabla 21.-Matriz de comparación por pares. Criterio: presupuesto.....        | 65 |
| Tabla 22.-Análisis de consistencia criterio: presupuesto.....                | 66 |
| Tabla 23.-Matriz normalizada. Criterio: funcionalidad .....                  | 66 |
| Tabla 24.-Matriz normalizada. Criterio: planeamiento urbanístico .....       | 66 |
| Tabla 25.-Matriz normalizada. Criterio: impacto ambiental .....              | 67 |
| Tabla 26.-Matriz normalizada. Criterio: geotecnia.....                       | 67 |
| Tabla 27.-Matriz Normalizada. Criterio: presupuesto.....                     | 67 |
| Tabla 28.-Vector. Criterio: funcionalidad .....                              | 67 |
| Tabla 29.-Vector. Criterio: planeamiento urbanístico .....                   | 67 |
| Tabla 30.-Vector. Criterio: impacto ambiental .....                          | 68 |
| Tabla 31.-Vector. Criterio: geotecnia.....                                   | 68 |
| Tabla 32.-Vector. Criterio: presupuesto .....                                | 68 |
| Tabla 33.-Vector de prioridad de las alternativas .....                      | 68 |
| Tabla 34.-Valoración de las alternativas para cada criterio.....             | 69 |
| Tabla 35.-Matriz de decisión .....   | 70 |
| Tabla 36.-Cuadrado de los valores .....                                      | 70 |
| Tabla 37.-Normalización de la matriz de decisión.....                        | 71 |
| Tabla 38.-Matriz normalizada ponderada.....                                  | 71 |
| Tabla 39.-Determinación PIS-NIS.....   | 72 |
| Tabla 40.-Distancias $A^+$ .....   | 73 |

|   |    |
|---|----|
| Tabla 41.-Distancias $A^-$ .....  | 73 |
| Tabla 42.-Matriz solución .....   | 74 |
| Tabla 43.-Weighted Sum Model (Método de suma ponderada).....                            | 74 |
| Tabla 44.-Weighted Product Model (Método de producto ponderado).....                    | 75 |
| Tabla 45.-WPM relative to minimum in the set (Con relación al mínimo del conjunto)..... | 75 |
| Tabla 46.-Ranking de las alternativas para cada método .....                            | 77 |



## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1.-Proceso de toma de decisión.....                             | 21 |
| Figura 2.-Esquema de valoración de alternativas .....                  | 30 |
| Figura 3.-Diagrama de flujo del proceso analítico jerárquico AHP ..... | 33 |
| Figura 4.-Ilustración de distancias al ideal y al anti-ideal.....      | 41 |
| Figura 5.-Pasos del método TOPSIS .....                                | 42 |
| Figura 6.-Esquema de valoración de alternativas .....                  | 53 |
| Figura 7.-Alternativas .....   | 60 |

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. Introducción del problema

La necesidad de conectar a las personas con las ciudades, pueblos o simplemente hacer más accesible una población o zona de esta, son algunos de los argumentos para llevar a cabo un nuevo trazado de una vía.

El trazado de una vía es un elemento fundamental para la circulación de vehículos. Para que la vía resulte segura y cómoda es necesario disponer de una superficie preparada, que reúna unas condiciones adecuadas para permitir el movimiento de los vehículos hasta las velocidades que normalmente estos suelen alcanzar, sin que la conducción se convierta en una tarea fatigosa y arriesgada. Dado el carácter que tiene la circulación por una vía, es necesario que el conjunto de las vías que hay en un área determinada (una ciudad, una región, una nación) formen una red viaria con suficientes conexiones entre las distintas vías para permitir el movimiento de vehículos entre dos puntos cualesquiera de la misma.

El trazado de una vía se puede definir como la unión de dos puntos entre sí. El camino más corto entre dos puntos es la línea recta, pero esta alternativa no siempre es posible o es la más adecuada en el contexto de la red viaria, ya que junto al criterio de longitud de la vía, también son considerados otros criterios. Así en el problema de la selección del trazado de una vía, se debe tener en consideración, el conjunto de trazados a valorar para conectar los dos puntos, así como el conjunto de criterios que caracterizan a cada trazado y la relevancia o importancia de cada uno de ellos en el

proceso de selección. En la literatura podemos encontrar los múltiples criterios que caracterizan a los trazados de una vía, siendo los siguientes:

1. **Funcionalidad:** En términos de mejora de tráfico y niveles de servicio, mide la reducción del tiempo de paso por el tramo, disminuyendo con ello los accidentes, la polución, etc. [1].
2. **Afecciones al planeamiento urbano:** Mide el efecto al planeamiento urbano previsto para la zona en sus normas subsidiarias o PGOU (Plan General de Ordenación Urbana), determina el ámbito territorial de cada una de las distintas clases de suelo, ordena el suelo urbano, fija la regulación general del suelo urbanizable y establece las normas de protección del suelo no urbanizable [2].
3. **Impacto ambiental:** Es el efecto causado por una actividad humana sobre el medio ambiente. Incluye la ecología, que estudia la relación entre los seres vivos y su ambiente, se encarga de medir dicho impacto y de tratar de minimizarlo [3][45].
4. **Caracterización geotécnica:** La geotecnia es la ciencia dedicada a la investigación, estudio y solución a los problemas relacionados con las propiedades mecánicas, hidráulicas e ingenieriles que surgen como resultado de la interacción entre la geología y las obras y actividades del hombre, así como a la predicción y desarrollo de medidas para la prevención o remediación de peligros geológicos. Para su desarrollo requiere la aplicación de diferentes campos del conocimiento, entre ellos, la mecánica de suelos, la mecánica de rocas, la geología, la geofísica, la hidrología, la hidrogeología y las ciencias relacionadas [4].
5. **Presupuesto:** El coste de llevar a cabo dicho trazado [5][48].

Dichos criterios, tienen diferente trascendencia a la hora de seleccionar el trazado de una vía para unir dos puntos, ya que existen criterios que son más significativos, por ejemplo la funcionalidad, impacto ambiental o presupuesto y otros que son menos relevantes como las afecciones al planeamiento urbano y la caracterización geotécnica.

Por tanto, la decisión para la selección del trazado de una vía puede ser vista como un problema de toma de decisión multicriterio, ya que involucra la evaluación de un conjunto de alternativas, caracterizada por un conjunto de criterios, donde frecuentemente se encuentran en conflicto unos con otros [6].

En la literatura se encuentran diversos métodos de toma de decisión multicriterio que pueden ser utilizados para resolver el problema de la selección de un trazado. Así, se puede citar: El Proceso Analítico Jerárquico (Analytic Hierarchy Processes AHP) [6], Técnica para ordenar las preferencias mediante similitud a la solución ideal (The Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution TOPSIS) [7], Ponderación lineal (Scoring) [8], Teoría de la utilidad Multi-Atributo (Theory of Multi Attribute Utility MAUT) [9], Modelo de suma ponderada (Weighted Sum Model WSM) [10], Modelo de producto ponderada (Weighted Product Model WPM) [10], Weighted Product Model relative to minimum in the set [11], Método de preferencia ranking organización para enriquecimiento de la evaluación (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation PROMETHEE) [11], Eliminación y elección de expresar la realidad, (Elimination and Choice Expressing the Reality ELECTRE) [12].

Entre todos estos métodos de toma de decisión multicriterio, destacan dos de ellos. El primero es el método de toma de decisión TOPSIS [7] (*The Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*), el cual está basado en que la alternativa escogida debe ser aquella con la distancia más corta a la solución ideal positiva y la distancia más lejana a la solución ideal negativa. El segundo de ellos, el AHP es un proceso que requiere las evaluaciones subjetivas respecto a la importancia relativa de cada uno de los criterios y la preferencia de cada par de alternativas respecto a cada criterio [8]. Dicho método modela el problema a través de una estructura jerárquica, utiliza una escala de prioridades en la preferencia de una alternativa sobre otra por cada criterio, combinando la multiplicidad de escalas correspondientes a los diferentes criterios, sintetiza los juicios emitidos y proporciona un ranking u ordenamiento de las alternativas de acuerdo con los pesos obtenidos (prioridades) de los criterios implicados [62].

Así, como se ha comentado, el método AHP además de permitir calcular la mejor alternativa para un problema, permite calcular la relevancia (prioridades) de los criterios implicados en el problema de decisión. Para ello, se lleva a cabo un procedimiento para cuantificar juicios u opiniones sobre la importancia relativa de cada uno de los criterios en conflicto empleados en el proceso de toma de decisión.

Como se ha visto anteriormente, en la selección de un trazado de una vía, intervienen 5 criterios: funcionalidad, planeamiento urbano, impacto ambiental, caracterización geotécnica y presupuesto. Dado que dichos criterios no tienen la misma relevancia para seleccionar el trazado de una vía es necesario valorar y fijar la importancia de cada criterio en el problema de toma de decisión y, posteriormente, llevar a cabo la valoración de las diferentes alternativas teniendo en cuenta la relevancia de cada criterio para escoger la mejor de ellas.

Este trabajo fin de máster se centra en la selección de una vía desde el PK 74+451 al PK 79+440 de la A-315 de Cuevas del Campo (Granada) [13], mediante modelos de toma de decisión multicriterio, considerando la relevancia de los criterios que caracterizan a los trazados de una vía. El motivo de realizar un nuevo trazado se centra en que la carretera A-315, está siendo “absorbida” por el pueblo ya que la construcción de viviendas ha aumentado en ambos márgenes de la misma. De esta forma la velocidad del tráfico se ve reducida para aquellos vehículos que no tienen como destino Cuevas del Campo. Además, se ha construido un nuevo polígono industrial junto a la carretera que hará aumentar el tráfico de vehículos pesados por lo que interesa separar todo lo posible esos tráficos. Finalmente, debido al número creciente de viviendas en la zona, la carretera actual causa molestias y problemas derivados del tráfico: ruidos, vibraciones, accidentes, polución, etc.

Para resolver el problema de decisión de seleccionar el trazado de una carretera desde el PK 74+451 al PK 79+440 de la A-315 de Cuevas del Campo teniendo en cuenta la relevancia de los criterios, en este trabajo fin de máster se propone su resolución a través de métodos de toma de decisión AHP y TOPSIS. Para ello, primero se propone valorar la relevancia de los criterios que definen los trazados de una vía a través del método AHP con el fin de fijar su peso. Posteriormente, se valoran los tres posibles trazados atendiendo a dichos criterios y a través de dos métodos de toma de decisión multicriterio: TOPSIS y AHP, se selecciona el trazado más adecuado de la vía. Además, finalmente, se elabora un estudio comparativo con otros métodos de TDMC (Toma de Decisión Multicriterio) para resolver el mismo problema con el fin de cerciorarnos de la alternativa más fiable.

## **1.2. Propuesta**

El propósito del trabajo fin de máster consiste en el estudio comparativo de los modelos de toma de decisión multicriterio AHP y TOPSIS en el problema de decisión del trazado de una vía, para seleccionar el mejor trazado entre un conjunto de trazados posibles, considerando el peso de los criterios, y su comparación con otros métodos de TDMC con el fin de escoger la alternativa más fiable.

## **1.3. Objetivos**

Los objetivos que tiene este trabajo fin de máster son los que a continuación se exponen:

- Desarrollar una revisión sobre la toma de decisiones y su relación con el problema de selección del trazado de una vía.

- Desarrollar el método de decisión AHP para establecer el peso de los 5 criterios que intervienen en el problema de selección del trazado de una vía.
- Desarrollar el método TOPSIS para seleccionar el trazado de una vía, en concreto en la A-315 de Cuevas del Campo, entre un conjunto de tres posibles trazados, teniendo en cuenta la importancia de los 5 criterios que deben ser evaluados.
- Desarrollar el método AHP para seleccionar el trazado de una vía, en concreto en la A-315 de Cuevas del Campo, entre un conjunto de tres posibles trazados, teniendo en cuenta la importancia de los 5 criterios que deben ser evaluados.
- Desarrollar un estudio comparativo con otros métodos de TDMC para resolver el problema con el fin de cerciorarnos que la alternativa escogida es la más fiable.

#### 1.4. Estructura del trabajo fin de máster

Para alcanzar los objetivos que se marcan en este trabajo fin de máster, esta memoria se estructura en los siguientes capítulos:

En el **Capítulo 2**, se realiza una descripción del problema de toma a la decisión y su clasificación. Además, se expone la relación existente entre un problema de toma de decisión y el problema de selección del trazado de una vía. Finalmente, se describe el proyecto técnico que debe de realizarse para la selección de una vía.

En el **Capítulo 3**, se realiza una revisión de los métodos de toma de decisión multicriterio más populares en la literatura, de los cuales se usarán los más relevantes para hacer un estudio comparativo para resolver el problema. A continuación, se realiza una descripción en profundidad de los dos métodos más destacados de toma de decisión multicriterio: el método TOPSIS y el proceso analítico jerárquico (AHP).

En el **Capítulo 4**, se presenta el caso de estudio para la selección del trazado de un vía, en concreto en la A-315 de Cuevas del Campo, mediante métodos de toma de decisión multicriterio. En primer lugar, se lleva a cabo el método AHP para obtener la importancia de cada uno de los criterios. Posteriormente, el AHP y método TOPSIS son desarrollados para seleccionar la mejor alternativa entre

las tres alternativas que serán evaluadas. Finalmente, se realiza un estudio comparativo con otros métodos de TDMC para resolver el problema.

En el **Capítulo 5**, se señalan las conclusiones de esta memoria y las futuras líneas de trabajo.

Finalmente, en la **Bibliografía**, se hace referencia a todos los documentos, consultados y utilizados para la elaboración del trabajo fin de máster.

## **CAPÍTULO 2**

### **TOMA DE DECISIÓN EN EL PROBLEMA DE SELECCIÓN DEL TRAZADO DE UNA VÍA**

El interés de este trabajo fin de máster se centra en el proceso de selección del trazado de una vía donde es necesario realizar un análisis exhaustivo del conjunto de posibles trazados para seleccionar el mejor de ellos. Este análisis es similar al que se realiza en los problemas de toma de decisiones, en los que antes de tomar una decisión, se lleva a cabo un proceso de análisis que permite al decisor o a los decisores tomar decisiones de una forma coherente. Dicho análisis es el responsable de realizar un estudio metódico y analítico que ayuda a analizar las alternativas, criterios, etc., del problema que se está estudiando [61].

Las propuestas que se presentan en esta memoria están basadas en modelos de toma de decisión. Por ello, en primer lugar, en este capítulo se realiza una revisión de los problemas de toma de decisión y su relación con el problema de selección del trazado de un vía. Una vez que se han expuesto los conceptos necesarios en el área de decisión para la comprensión de nuestra propuesta, se realiza una descripción de la relación existente entre un problema de toma de decisión y el problema de selección del trazado de un vía. Finalmente, se describen los aspectos técnicos a definir en un proyecto de selección del trazado de una vía.



## 2.1. Toma de decisión

En nuestra vida diaria nos vemos continuamente sometidos a procesos de toma de decisiones que puede ir desde la elección de la ropa por la mañana hasta si cambiamos o no de trabajo.

La toma de decisión siempre se basa en el objetivo que se pretende alcanzar, analizando cada una de las alternativas. El proceso de análisis de las alternativas se realiza a partir de la información que se dispone, ya sea proveniente de fuentes objetivas o por personas o expertos que proporcionan sus valoraciones u opiniones [6].

Los métodos de toma de decisión, proporcionan enfoques para seleccionar la alternativa que mejor se adecúe al objetivo que se pretende lograr. Para ello, hay que tener en cuenta una serie de elementos básicos [15]:

1. Uno o varios objetivos a alcanzar.
2. Un conjunto de alternativas o decisiones posibles para alcanzar dichos objetivos.
3. Un conjunto de criterios o estados de la naturaleza que definen el contexto en el que se plantea el problema de decisión. Un conjunto de valores de utilidad o consecuencias asociados a los pares formados por cada alternativa y cada criterio.

Según las características de los elementos del problema de toma de decisión, dichos problemas se pueden clasificar en diferentes categorías atendiendo a distintos puntos de vista.

A continuación, se revisa la clasificación de los problemas de toma de decisión según la teoría de decisión.

## 2.2. Clasificación de los problemas de toma de decisiones

Debido a las distintas situaciones o problemas de toma de decisión que se pueden presentar en la vida cotidiana, la teoría de la decisión [16][17] ha constituido una serie de criterios que admiten una clasificación de los problemas de toma de decisión considerando diferentes puntos de vista:

1. Según el número de criterios o atributos que se han de valorar en la toma de decisión.
2. Según el ambiente de decisión en el que se han de tomar las decisiones.

3. Según el número de expertos que participan en el proceso de decisión.

En los siguientes apartados se explica cada punto de vista de esta clasificación.

#### a. Número de Criterios

El número de criterios o atributos que se tienen en cuenta en los procesos de decisión para obtener la solución permite clasificar a los problemas de decisión en dos tipos [18][19][20][21][22][23]:

1. Problemas con un solo criterio o atributo. Problemas de decisión en los que, para evaluar las alternativas, se tiene en cuenta un único criterio o atributo que representa la valoración dada a esa alternativa. La solución se obtiene como la alternativa que mejor resuelve el problema teniendo en cuenta este único criterio.

Consideremos un problema de toma de decisión en el que se plantea cambiar de lavadora y se propone tres posibles alternativas, siendo el criterio de optimización de la decisión el criterio “precio”. Este problema de toma de decisión será muy sencillo de solucionar puesto que seleccionaríamos la alternativa con el menor precio.

En los problemas de decisión de un único criterio, cada alternativa es caracterizada por un único valor. Sea  $X=\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  el conjunto de alternativas del problema. La descripción del problema se encuentra en la Tabla 1.

| Alternativas | Valoración |
|--------------|------------|
| $x_1$        | $y_1$      |
| ...          | ...        |
| $x_n$        | $y_n$      |

Tabla 1.-Esquema general de un problema de toma de decisión con un único criterio

Cada entrada,  $y_i$ , de la tabla indica la valoración de la alternativa,  $x_i$ . Según el marco de definición del problema, cada,  $y_i$ , estaría valorada en un dominio de expresión determinado (numérico, intervalar, lingüístico, etc.).

2. Problemas multicriterio o multiatributo. Problemas de decisión en los que, para evaluar las alternativas, se tiene en cuenta dos o más criterios o atributos que definen cada alternativa. La alternativa solución será aquella que mejor resuelva el problema considerando todos estos criterios o atributos.

Consideramos el problema del caso anterior. Dicho problema se complicaría y el proceso para resolverlo sería distinto si, además de considerar el precio, también tuviésemos en cuenta otros criterios o atributos como el *diseño*, el *consumo energético*, la *carga de ropa* de la lavadora. En esta ocasión, se enfrentaría a un problema en el que se consideran varios criterios o atributos para tomar una decisión y, entonces, hablamos de un problema de decisión multicriterio o multiatributo.

En los problemas de toma de decisión multicriterio, cada alternativa es caracterizada por un único valor. Sea  $X=\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  y  $C=\{c_1, c_2, \dots, c_h\}$  el conjunto de alternativas y el conjunto de criterios respectivamente, que caracterizan una situación de decisión determinada. La Tabla 2 nos daría el diseño de la información:

| Alternativas | Criterios |          |     |          |
|--------------|-----------|----------|-----|----------|
|              | $c_1$     | $c_2$    | ... | $c_h$    |
| $(x_i)$      |           |          |     |          |
| $x_1$        | $y_{11}$  | $y_{12}$ | ... | $y_{1h}$ |
| $x_2$        | $y_{21}$  | $y_{22}$ | ... | $y_{2h}$ |
| ...          | ...       | ...      | ... | ...      |
| $x_n$        | $y_{n1}$  | $y_{n2}$ | ... | $y_{nh}$ |

Tabla 2.-Esquema general de un problema de toma de decisión multicriterio

Cada entrada,  $y_{ij}$ , indica la preferencia de la alternativa,  $x_i$ , respecto del criterio,  $c_j$ . Los problemas de toma de decisión multicriterio son más complejos de resolver que los problemas en los que hay un solo criterio, ya que hay que resumir la información de una alternativa en un único valor. Así, será necesario establecer algún mecanismo que permita construir una valoración global para cada alternativa, algunos ejemplos pueden ser consultados en [17][24].

En este contexto, el *proceso de selección del trazado de una vía* puede ser visto como un problema de toma de decisión *multicriterio*, ya que intervienen múltiples criterios, en concreto los 5 criterios: funcionalidad, mejora de tráfico y niveles de servicio, afecciones al planeamiento urbano, impacto ambiental, caracterización geotécnica y, finalmente, presupuesto.

## b. Ambiente de Decisión

El ambiente de decisión viene definido por las características y el marco en el que se va a llevar a cabo la toma de decisión. La teoría clásica de la decisión distingue tres situaciones o ambientes de decisión [16][17]:

1. Ambiente de certidumbre. Un problema de decisión está definido en un ambiente de certidumbre cuando son conocidos con exactitud todos los elementos o factores que intervienen en el problema.

Esta situación permite asignar valores cuantitativos de utilidad a cada una de las alternativas presentes en el problema.

Por ejemplo se quiere organizar una excursión a Sierra Nevada para esquiar un fin de semana. Se conocen *los costes de alojamiento y transporte por persona*, con lo que los factores que determinan *el coste* de la excursión están determinados y se puede elegir el hotel y la agencia de transporte que resulte adecuada a los objetivos.

2. Ambiente de riesgo. Un problema de decisión está definido en un ambiente de riesgo cuando alguno de los elementos o factores que intervienen están sujetos a las leyes del azar. En estos casos, los problemas pueden ser resueltos utilizando la teoría de la probabilidad.

En el ejemplo anterior se tendría que tener en cuenta las *posibles cancelaciones de última hora*. A la vista de resultados de experiencias anteriores se tendría que analizar la conveniencia o no de aceptar más reservas de plazas de las que realmente dispone un hotel, lo que podría conllevar una situación de overbooking.

3. Ambiente de Incertidumbre. Un problema de decisión está definido en un ambiente de incertidumbre cuando la información disponible sobre las distintas alternativas puede ser incompleta, vaga o imprecisa. Esta incertidumbre surge a raíz del intento de modelar la imprecisión propia del comportamiento humano o la inherente a ciertos fenómenos que por su naturaleza son inciertos (imprecisos).

En el ejemplo anterior *la calidad de la nieve podría tener un factor de incertidumbre*, porque no se puede medir con exactitud.

El proceso de selección del trazado de una vía puede ser visto como un problema de toma de decisión bajo *certidumbre*, ya que existen criterios que pueden valorarse con exactitud.

**c. Números de Expertos**

Otra perspectiva, a la hora de clasificar los problemas de decisión, hace referencia al número de expertos o fuentes de información con las que se toma la decisión. Cuando múltiples expertos proporcionan sus opiniones o valoraciones es necesario agregar dicha información. Dependiendo del problema de toma de decisión, el hecho de que intervengan varios expertos con puntos de vista diferentes puede ofrecer una solución más satisfactoria al problema de decisión [17][28].

Teniendo en cuenta el número de expertos que forman parte en el proceso de toma de decisión, los problemas de decisión se pueden clasificar en dos tipos [23]:

- i. Unipersonales o individuales. Las decisiones son tomadas por un único experto. En los problemas de toma de decisión unipersonal o individual, cada alternativa es valorada por un único experto. Sea  $X=\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  el conjunto de alternativas que son valoradas por el experto. La siguiente Tabla 3 da el diseño de la información, considerando que solamente existe un único criterio.

| Alternativas | Experto |
|--------------|---------|
| $(x_j)$      | $e$     |
| $x_1$        | $y_1$   |
| ...          | ...     |
| $x_n$        | $y_n$   |

Tabla 3.-Esquema general de un problema de toma de decisión con un solo experto y un solo criterio

Cada entrada,  $y_i$ , de la tabla indica la valoración dada por el experto,  $e$ , sobre la alternativa,  $x_i$ . Según el marco de definición del problema, cada  $y_i$  estará valorada en un dominio de expresión determinado (numérico, lingüístico, etc.).

- ii. En Grupo o Multiexperto. Las decisiones son tomadas en conjunto por un grupo de expertos que intenta alcanzar una solución, en común, al problema. El número de expertos en problemas de decisión multiexperto se asume que es finito. Sean  $X=\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  y  $E=\{e_1, e_2, \dots, e_m\}$  el conjunto de alternativas y el conjunto de

expertos respectivamente, que valoran cada alternativa que caracteriza una situación de decisión determinada, por tanto una forma de diseño de la información del problema con un solo criterio es señalada en la Tabla 4.

| Alternativas | Expertos |          |     |          |
|--------------|----------|----------|-----|----------|
|              | $e_1$    | $e_2$    | ... | $e_m$    |
| $(x_i)$      |          |          |     |          |
| $x_1$        | $y_{11}$ | $y_{12}$ | ... | $y_{1m}$ |
| $x_2$        | $y_{21}$ | $y_{22}$ | ... | $y_{2m}$ |
| ...          | ...      | ...      | ... | ...      |
| $x_n$        | $y_{n1}$ | $y_{n2}$ | ... | $y_{nm}$ |

Tabla 4.-Esquema general de un problema de toma de decisión multiexperto con un solo criterio

Cada entrada,  $y_{ij}$ , de la tabla indica la preferencia del experto,  $e_j$ , sobre la alternativa,  $x_i$ .

Una situación de decisión habitual son los problemas de decisión multiexperto multicriterio, en los que cada experto expresa las preferencias sobre distintos criterios que definen cada alternativa [17].

| Experto ( $e_1$ ) | Criterios  |            |     |            |
|-------------------|------------|------------|-----|------------|
| Alternativas      | $c_1$      | $c_2$      | ... | $c_h$      |
| $x_1$             | $y^1_{11}$ | $y^1_{12}$ | ... | $y^1_{1h}$ |
| ...               | ...        | ...        | ... | ...        |
| $x_n$             | $y^1_{n1}$ | $y^1_{n2}$ | ... | $y^1_{nh}$ |

| Experto ( $e_m$ ) | Criterios  |            |     |            |
|-------------------|------------|------------|-----|------------|
| Alternativas      | $c_1$      | $c_2$      | ... | $c_h$      |
| $x_1$             | $y^m_{11}$ | $y^m_{12}$ | ... | $y^m_{1h}$ |
| ...               | ...        | ...        | ... | ...        |
| $x_n$             | $y^m_{n1}$ | $y^m_{n2}$ | ... | $y^m_{nh}$ |

Tabla 5.-Esquema general de un problema de toma de decisión multicriterio multiexperto

Cada experto,  $e_i$ , proporciona la entrada de la tabla,  $y^i_{jk}$ , que indica la valoración de la alternativa,  $x_j$ , respecto del criterio,  $c_k$ .

En el proceso de selección del trazado de una vía, normalmente, es visto como un problema de toma de decisión con *un solo experto*, ya que un solo experto es suficiente para proporcionar la información. Aunque, como se ha comentado, la participación de varios expertos nutrirá la solución final.

### 2.3. Análisis de decisión para la selección del trazado de una vía

El presente trabajo fin de máster se basa en el estudio comparativo de modelos de toma de decisión multicriterio para la selección del trazado de una vía con el fin de realizar la elección de la alternativa más fiable.

A continuación, se describe los pasos que han de ser llevados a cabo en cualquier problema de toma de decisión, los cuales pueden ser agrupados en dos fases “Análisis de decisión” y “Toma de la decisión” [7], en la Figura 1 se representa gráficamente el proceso de toma de decisión:

#### ***Análisis de decisión.***

- Identificar el problema y las alternativas.
- Identificar los criterios de decisión y ponderarlos.
- Recoger la información de las alternativas.
- Obtener una valoración para las distintas alternativas.
- Selección de la mejor alternativa.

#### ***Tomar la decisión.***

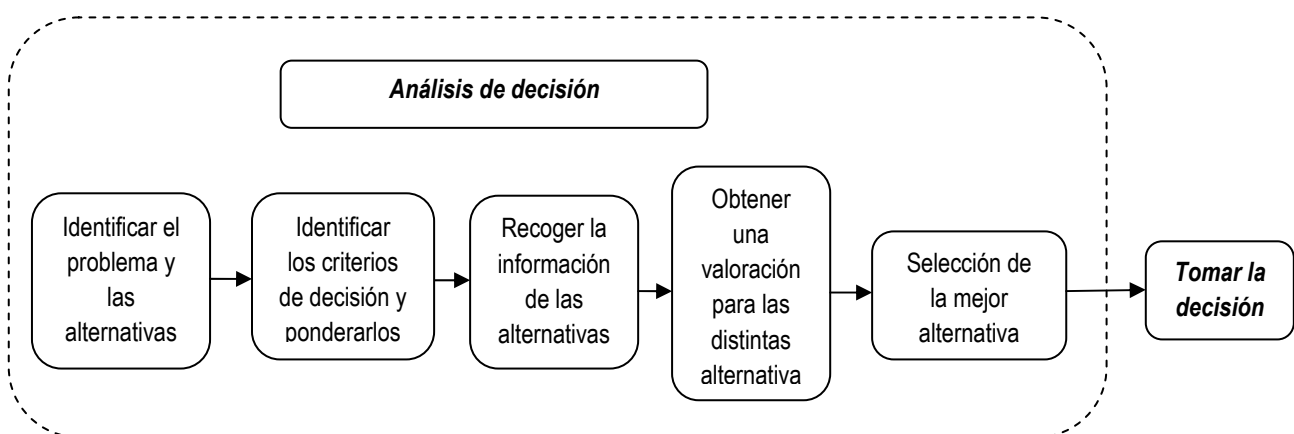


Figura 1.-Proceso de toma de decisión

Cada una de las fases se detalla a continuación.

## ***Análisis de Decisión***

### **1. Identificar el problema y las alternativas**

En esta fase se analiza el problema y se reconoce que es necesario tomar una decisión para poder solucionarlo. En la identificación del problema es imprescindible tener una visión clara y objetiva, además de saber escuchar las opiniones de los demás para poder formular un objetivo común. Esta primera etapa es muy importante, pues constituye el punto de partida de toda decisión.

### **2. Identificar los criterios de decisión y ponderarlos**

Consiste en identificar aquellos elementos que influyen en las alternativas entre las que hay que decidir, es decir, aquellos aspectos de los cuales depende la decisión que se va a alcanzar.

A veces es necesario realizar una ponderación de estos criterios, es decir, asignar un valor relativo a la importancia de dicho criterio en la decisión que se tome. Esto se hará cuando sea necesario acentuar la importancia de determinados criterios con respecto a otros.

Como se ha comentado, las distintas alternativas son caracterizadas por un conjunto de criterios, los cuales pueden clasificarse en dos tipos:

- a) Criterios cuantitativos: Son criterios que se pueden medir en términos numéricos, por ejemplo, el tiempo, los costes asociados, medidas o pesos, etc.
- b) Criterios cualitativos: Estos criterios son difíciles de medir de forma numérica, ya que se basan en conceptos vagos, imprecisos y/o subjetivos, por lo que se suelen medir a través de términos lingüísticos. Ejemplos de estos factores son calidad o servicio.

### **3. Recoger la información de las alternativas**

En esta fase se debe recolectar la información de las alternativas, es decir, se debe analizar los diferentes elementos que influyen en la resolución del problema que se está llevando a cabo para extraer la máxima cantidad de información que permita obtener una solución lo más precisa posible.

### **4. Obtener una valoración para las distintas alternativas**

En esta fase se computará para cada una de las alternativas una valoración global que resume la información recogida sobre cada alternativa y determine lo adecuadas que es cada una de ellas para



solucionar el problema. Dicha valoración resume la información recogida en el anterior paso, es decir, mira sus ventajas y desventajas con respecto a los criterios de decisión.

#### 5. Selección de la mejor alternativa

En este paso se escoge la opción que mejores resultados aportaría al problema tratado según la evaluación previamente asignada. Existen diferentes técnicas que permiten valorar los resultados de las evaluaciones atendiendo a múltiples criterios.

A la hora de seleccionar la mejor alternativa se pueden emplear diferentes opciones según la precisión o rapidez del resultado que se desea aportar. En este sentido podemos optar por:

- i. Maximizar: En este caso, se opta por la mejor decisión posible entre todas las alternativas aportadas.
- ii. Satisfacer: Otra opción sería elegir la primera opción que sea mínimamente aceptable, siempre que satisfaga la meta u objetivo planteado.
- iii. Optimizar: En este último caso, se seleccionaría la opción que mejor equilibrio aportara entre los diferentes objetivos que se persiguen.

#### **Tomar la decisión**

El proceso no acaba una vez que se identifica la mejor alternativa, ya que el siguiente paso es tomar la decisión, es decir, que dicha alternativa debe ser aplicada, puesta en práctica. La puesta en marcha de la solución puede ser llevada a cabo por las mismas personas que han llegado a ella o, como en otros casos, ambas actividades son llevadas por grupos de personas distintos, ya que en muchas ocasiones las decisiones vienen de niveles superiores en la jerarquía de la organización. Sea de un modo u otro, siempre debe existir la comprensión total de la decisión tomada, así como, las razones que han llevado a esa conclusión para que la implementación sea lo más exitosa posible. Por ello, siempre es recomendable que, aunque los responsables que toman la decisión sean distintos que los que la pongan en práctica, se impliquen a todos los integrantes desde el inicio del proceso.

En el estudio de nuestro trabajo del proceso de la selección del trazado de una vía, se lleva a cabo un análisis de decisión donde se recoge toda la información que influya de alguna manera en el objetivo que se desea acometer, así como, las características propias de cada una de las alternativas planteadas para, de esta manera, poder seleccionar la alternativa que mejor se ajusta a los objetivos concretos y en el contexto determinado.

En nuestro caso, nos encontramos ante un problema de toma de decisión multicriterio bajo certidumbre donde participa un único experto. En este problema de decisión, se definen un conjunto de 5 criterios que influyen en la selección del trazado de una vía y donde será necesario calcular su relevancia.

## 2.4. Proyecto de selección del trazado de una vía

Dado que nuestro trabajo fin de máster se centra en la selección del trazado de una vía. En esta sección se describen los diferentes conceptos que deben ser fijados en la elaboración de un proyecto para la selección del trazado de una vía [13].

En el proceso de selección de una vía se consideran tres etapas principales: recogida de información, diseño y ejecución de la obra. Aunque estas tres etapas son cronológicamente consecutivas es frecuente que durante la ejecución de la obra aparezcan problemas sobrevenidos que obliguen a rediseñar el proyecto de la selección del trazado de una vía y a una nueva recogida de información.

Según el tipo de estudio que se vaya a considerar será indispensable emplear la normativa en vigor referente a: técnicas generales para obras de carreteras y puentes[29], contratos de las administraciones públicas[30], pliego de cláusulas administrativas[31], construcción, conservación y explotación de las autopistas[32], recepción de cementos[33], hormigón estructural[34], carreteras[35], drenaje superficial[36], secciones de firmes[37], señalización vertical[38], señalización de obras en las carreteras[39], señalización, balizamiento, defensa y limpieza[40], sismorresistente[41][42], impacto ambiental[44][45][46][47].

En el proyecto de selección del trazado de una vía se deben fijar los siguientes conceptos:

1. **Datos básicos:** Delimitar nuestra zona de actuación en la correspondiente hoja del mapa topográfico nacional. Denominación de la carretera especificando su número, jerarquía y puntos kilométricos entre los cuales vamos a trabajar. Término, o términos, municipales donde se va a realizar el trazado de una vía.
2. **Estudio geológico:** Descripción de los accidentes geográficos más representativos: barrancos, collados, cerros, picos, ríos, embalses, sismología, climatología de la zona, todos estos datos nos ayudaran a la realización de cálculos posteriores.
3. **Características socioeconómicas de la zona:** Dedicación de la población, existencia o no de industria, tipos de industria.

4. **Tráfico y planeamiento:** Estudiar el tipo, la cantidad de tráfico que circula por el trazado de una vía y el suelo que ocupa ésta.  
Un factor a tener en cuenta es el del tráfico, ya que con él se pretende conocer el tipo de circulación que atraviesa la red viaria de la zona de influencia del tramo de estudio, además se deben de analizar los valores de tráfico del tramo y su composición.
5. **Definición geométrica:** Elaboración de la geometría del trazado de una vía, tanto en planta, alzado y sección transversal. Un buen trazado en una vía es muy importante a la hora de la realización del proyecto de ésta dependerá la comodidad y seguridad del usuario de la vía.
6. **Estudio geotécnico:** Exposición de las características y condiciones geotécnicas de los materiales que va a atravesar el trazado de una vía, para la elaboración del paquete de firmes.
7. **Movimiento de tierras:** Cantidad de tierras que habrá que mover o poner dependiendo de las características del terreno y de donde vayamos a ejecutar el trazado de una vía. El movimiento de tierras va a depender, a parte del terreno de la definición geométrica que se realice.
8. **Firmes y pavimentos:** Tipo de sección que vamos a utilizar para que los vehículos puedan circular en las mejores condiciones de conducción y seguridad. El tipo de sección de firmes va a depender del estudio geotécnico que se obtenga.
9. **Servicios afectados:** Reposición de todos los servicios que se rompan o se tengan que trasladar de su posición original a otra, debido al paso del trazado de una vía. Estos servicios pueden ser de todo tipo: eléctricos, tuberías, arquetas, obras de fábrica etc.
10. **Expropiaciones:** Ocupación de fincas colindantes. Al proceder a una selección del trazado de una vía debemos pensar que el suelo por donde va a pasar no es nuestro sino que es de otro propietario, entonces se tendrá que proceder a hacer las convenientes expropiaciones.
11. **Estudio del impacto ambiental:** Consideraciones ambientales que afecten al medio a la hora de la ejecución del trazado de una vía. En la actualidad se da importancia al impacto ambiental ya que todo lo referido al medio ambiente está siendo de mucha consideración. Esto quiere decir cómo va a estar de afectado el medio ambiente durante la ejecución del trazado de una vía, y cómo se va a quedar, que daños vamos a producir.

12. **Presupuesto:** Medición y coste de cada unidad elaborada en la obra hasta su recepción. Lo que va a costar la realización del trazado de una vía.
13. **Evaluación económica:** Rentabilidad del proyecto del trazado de una vía al cabo de los años de construcción. Habrá que preguntarse si es necesario y rentable realizar esta vía, debido al gasto económico que se tiene que hacer.

## **CAPÍTULO 3**

### **MÉTODOS DE TOMA DE DECISIÓN MULTICRITERIO. TOPSIS Y AHP**

El interés de este trabajo fin de máster es el proceso de selección de trazado de una vía, el cual puede ser visto como un problema de toma de decisión multicriterio donde intervienen los siguientes 5 criterios: funcionalidad, planeamiento urbano, impacto ambiental, geotecnia y presupuesto.

En este capítulo, se realiza una breve revisión sobre los métodos de toma de decisiones multicriterio más populares en la teoría de decisión, para a continuación, revisar en profundidad los dos métodos de decisión, AHP y TOPSIS, que serán utilizados en este trabajo fin de máster para llevar a cabo un caso de estudio de selección de un trazado de un vía. Así, el método de decisión AHP será utilizado en el siguiente capítulo para establecer el peso de los criterios y para la selección de una de las tres alternativas del trazado en el problema de selección del trazado de una vía y el método TOPSIS será utilizado para seleccionar el trazado de una vía entre un conjunto de tres posibles trazados, teniendo en cuenta la importancia de los múltiples criterios.

#### **3.1. Métodos de toma de decisión multicriterio**

Los métodos de toma de decisión multicriterio son eficientes para resolver problemas de toma de decisiones complejos, como es el caso del proceso de selección de un trazado en una vía.

A continuación se realiza una breve descripción de algunos de los métodos de decisión

multicriterio más usados en la literatura.

- El Proceso Analítico Jerárquico (Analytic Hierarchy Processes AHP) [6]. El AHP representa el problema en una jerarquía y utiliza comparaciones entre pares de elementos, construyendo matrices a partir de estas comparaciones, y usando elementos del álgebra matricial para establecer prioridades entre los elementos de un mismo nivel, con respecto a un elemento del nivel inmediatamente superior. Cuando las prioridades de los elementos en cada nivel se tienen definidas, se agregan para obtener las prioridades globales frente al objetivo principal. Los resultados frente a las alternativas se convierten entonces en un importante elemento de soporte para quien debe tomar la decisión.
- Técnica para ordenar las preferencias mediante similitud a la solución ideal (The Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution TOPSIS) [7]. El TOPSIS está basado en que la alternativa escogida debe ser aquella con la distancia más corta a la solución ideal positiva y la distancia más lejana a la solución ideal negativa. Es un método que compara un conjunto de alternativas mediante la identificación de los pesos para cada criterio, la normalización de las valoraciones de cada alternativa para cada criterio y el cálculo de la distancia entre cada alternativa y la alternativa ideal, que es la mejor puntuación en cada criterio.
- Modelo de suma ponderada (Weighted Sum Model WSM) [10]. El modelo de la suma ponderada es el más empleado. Si hay  $m$  alternativas y  $n$  criterios, la mejor alternativa será la que satisfaga en el caso de maximización la siguiente expresión:

$$A_{WSM-score}^* = \max_i \sum_{j=1}^n a_{ij} w_j \text{ para } i=1,2,3,\dots,m$$

- Modelo de producto ponderada (Weighted Product Model, WPM) [10]. El modelo del producto ponderado es muy similar al de suma ponderada. La principal diferencia es que en vez de suma en el modelo hay multiplicación. Cada alternativa es comparada con las otras al multiplicar un número de cocientes; uno para cada criterio. Cada cociente es elevado a la potencia equivalente al peso relativo del criterio correspondiente.

$$R(A_k / A_L) = \prod_{j=1}^n (a_{Kj} / a_{Lj})^{w_{j=1}}$$

- Modelo de producto ponderada en relación con el conjunto mínimo (Weighted Product Model relative to minimum in the set) [11]. En este modelo se busca la minimización de la máxima desviación de entre todas las desviaciones posibles.

A diferencia del modelo WGP que minimizaba la suma de las desviaciones, en este modelo lo que se minimiza es la desviación máxima.

- Programación por metas ponderadas (Weighted goals programming, WGP) [65]. Mediante este método se trata de hallar la solución al problema de decisión abordado por programación por metas, de forma intuitiva mediante la minimización de la suma de las variables de desviación no deseadas:

$$\text{MIN } p_i + \dots + p_k + n_j + \dots + n_l$$

- Ponderación lineal (Scoring) [8]. Es un método que permite abordar situaciones de incertidumbre o con pocos niveles de información. En dicho método se construye una función de valor para cada una de las alternativas. El método de ponderación lineal supone la transitividad de preferencias o la comparabilidad, es un método compensatorio, y puede resultar dependiente, y manipulable, de la asignación de pesos a los criterios o de la escala de medida de las evaluaciones.
- Teoría de la utilidad Multi-Atributo (Theory of Multi Attribute Utility MAUT) [9]. La MAUT tiene por objeto reducir los problemas de decisión en un contexto multicriterio a través de una función de utilidad cardinal, expresión matemática capaz de ordenar las alternativas de acuerdo con un criterio único (valor alcanzado por la función de utilidad), en función de los valores tomados por los distintos atributos ( $r_i$ ) considerados.
- Método de preferencia ranking organización para enriquecimiento de la evaluación (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation PROMETHEE) [11]. El método PROMETHEE ha sido diseñado para tratar con problemas de múltiples criterios,  $G = \{g_1, \dots, g_j, \dots, g_k\}$  en los que existen un conjunto finito de alternativas  $A = \{a_1, \dots, a_j, \dots, a_n\}$ . Este método requiere de cierta cantidad de información adicional sobre la relación de importancia entre los criterios. El experto deberá suministrar la ponderación de importancia relativa de los criterios en relación al objeto principal. Hace uso abundante del concepto de pseudocriterio ya que construye el grado de superación entre cada par de acciones ordenadas, tomando en cuenta la diferencia de puntuación que esas acciones poseen respecto a cada atributo. La evaluación de esas diferencias pueden realizarse mediante funciones de valor posibles y que son utilizadas de acuerdo a las preferencias del decisor, quien además debe proporcionar los umbrales de indiferencia y de preferencia asociados a estos pseudocriterios.

- Eliminación y elección de expresar la realidad. (Elimination and Choice Expressing the Reality ELECTRE) [12]. Familia de métodos basado en relaciones de superación para decidir acerca de la determinación de una solución, que sin ser óptima pueda considerarse satisfactoria; además de obtener una jerarquización de las acciones, alternativas bajo análisis.

Como se ha comentado anteriormente, en este trabajo fin de máster se va a realizar una comparación de métodos multicriterio para resolver el problema de decisión de la selección del trazado de una vía, considerando la relevancia de los criterios que caracterizan a las alternativas. En este problema intervienen múltiples criterios que no tienen la misma relevancia a la hora de seleccionar el trazado de una vía, por lo que es necesario fijar y valorar la importancia de cada criterio en el problema, en esta memoria se propone el método AHP para computar dicha importancia. Una vez que esté fijada la relevancia de cada uno de los criterios que interviene en la selección del trazado, se propone el uso del método TOPSIS y AHP para escoger entre un conjunto de alternativas el mejor trazado de una vía, considerado la relevancia de cada uno de los 5 criterios que caracterizan el trazado de una vía. Finalmente, se realiza un análisis comparativo con otros métodos de TDMC. La Figura 2 resume el esquema que se llevará a cabo para resolver el problema.

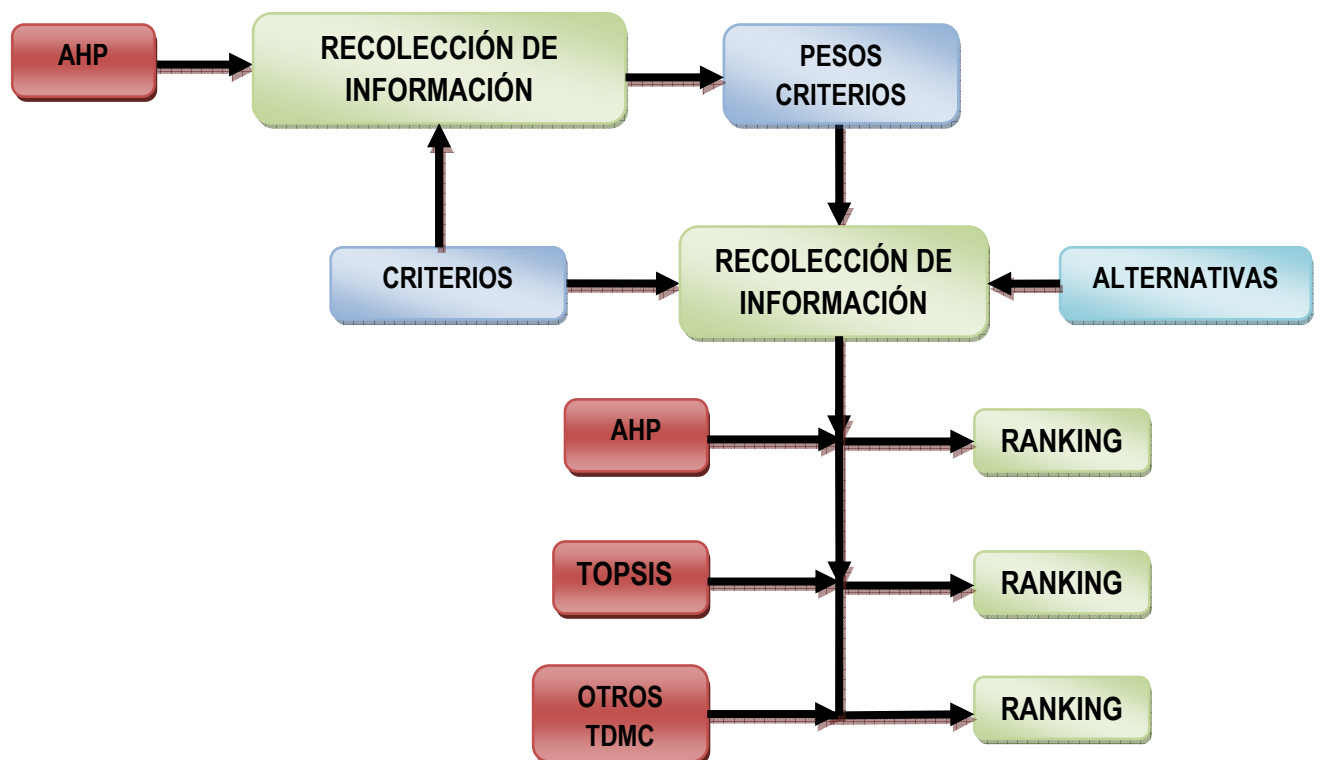


Figura 2.-Esquema de valoración de alternativas



### 3.2. El proceso analítico jerárquico (AHP)

Dado que en nuestra propuesta vamos a utilizar el método AHP para fijar el peso de los criterios así como y para la selección del trazado de la vía, a continuación se revisa en detalle dicho método.

El AHP es una herramienta muy flexible y eficaz porque las valoraciones, y, por lo tanto, la evaluación final se obtiene en base al emparejamiento de evaluaciones relativas tanto del criterio como de las alternativas dadas por el experto. Así, dicho método comprende [50]:

- Una técnica que permite la resolución de problemas multicriterio y multiexperto, incorporando en el modelo los aspectos tangibles e intangibles, así como el subjetivismo y la incertidumbre inherente en el proceso de toma de decisión.
- Una teoría matemática generalmente aplicada a la influencia entre alternativas respecto a un criterio o atributo.
- Una filosofía para abordar, en general la toma de decisión.

La principal característica del AHP, es que el problema de decisión se modeliza mediante una jerarquía en cuyo vértice superior está el principal objetivo del problema, meta a alcanzar, y en la base se encuentran las posibles alternativas a evaluar. En los niveles intermedios se representan los criterios (los cuales a su vez se pueden estructurar también en jerarquías) en base a los cuales se toma la decisión. El diseño de las jerarquías requiere experiencia y conocimiento del problema que se plantea, para la cual es indispensable disponer de toda la información necesaria.

La segunda característica del método es que, en cada nivel de la jerarquía, se realizan comparaciones entre pares de elementos de ese nivel, en base a la importancia o contribución de cada uno de ellos al elemento de nivel superior al que están ligados. Este proceso de comparación conduce a una escala de medida relativa de prioridades o pesos de dichos elementos. Las comparaciones por pares se realizan por medio de ratios de preferencia (si se comparan alternativas) o ratios de importancia (si se comparan criterios), que se evalúan según una escala numérica propuesta por el método, que más adelante se presentará. Los pesos o prioridades relativas deben sumar la unidad.

La tercera característica del AHP, es que la información obtenida es generalmente redundante y más o menos inconsistente. Las matrices de comparaciones por pares contienen juicios redundantes en el sentido de que en una matriz de tamaño  $(n \times n)$  se suelen emitir  $(n \times (n - 1)) / 2$  juicios (ya que conocido un término  $a_{ij}$  se obtiene fácilmente el término  $a_{ji}$  por la propiedad de reciprocidad),

cuando de hecho solo se necesitaran  $(n - 1)$  juicios si se utilizase el álgebra (pues si se conoce el término  $a_{ij}$  y el término  $a_{jk}$  es posible conocer, mediante sencillos cálculos, el término  $a_{ik}$ ). Esta diferencia en el número de juicios supone tiempo invertido que se podría haber evitado y puede producir inconsistencias dentro de la matriz. Sin embargo, desde otro punto de vista, esta redundancia resulta útil para mejorar la exactitud de los juicios y se aprovecha para, mediante la técnica matemática, reducir los errores y mejorar la consistencia de la matriz.

Una vez evaluada la contribución de cada elemento a los elementos del nivel de la jerarquía inmediatamente superior, se calcula la contribución global de cada alternativa al objetivo principal o meta mediante una agregación de tipo aditivo.

El proceso analítico jerárquico AHP [56] es una de las pocas técnicas multicriterio que ofrece una axiomática teórica y que tiene un mejor comportamiento práctico. También proporciona un modelo único fácilmente comprensible, flexible, para una amplia gama de problemas estructurados, una escala para medir imponderables y un método para esclarecer prioridades Integra enfoques deductivos y de sistemas para resolver problemas complejos. Refleja la tendencia natural de la mente a clasificar elementos de un sistema en diferentes niveles y a agrupar elementos similares en cada nivel. Conduce a una estimación completa de la conveniencia de cada alternativa.

Los inconvenientes que se encuentran en el AHP vienen por la justificación de la independencia exigida en la modelización jerárquica. La escala fundamental empleada para expresar los juicios relativos en las comparaciones pareadas. La forma de evaluar la consistencia de los juicios emitidos. Y por último la interpretación de las prioridades totales obtenidas en el procedimiento.

El método AHP se fundamenta en una serie de axiomas que se mencionan a continuación [52]:

**Axioma recíprocal.** Si frente a un criterio, una alternativa A es  $n$  veces mejor que B, entonces B es  $1/n$  veces mejor que A. Este principio es utilizado en el análisis matricial que se realiza a los criterios y las alternativas. Garantiza que el análisis se haga de manera bidireccional.

**Axioma de homogeneidad.** Los elementos que son comparados no deben diferir en mucho en cuanto a la característica de comparación establecida.

**Axioma de la síntesis.** Los juicios acerca de las prioridades de los elementos en una jerarquía no dependen de los elementos del nivel más bajo. Este axioma es rebatible y en algunos análisis no se aplica puesto que puede ser posible que exista dependencia de la importancia de un objetivo con el nivel más bajo.

A continuación se muestra el diagrama de flujo del proceso AHP, Figura 3 y una explicación de cada uno de los pasos del método.

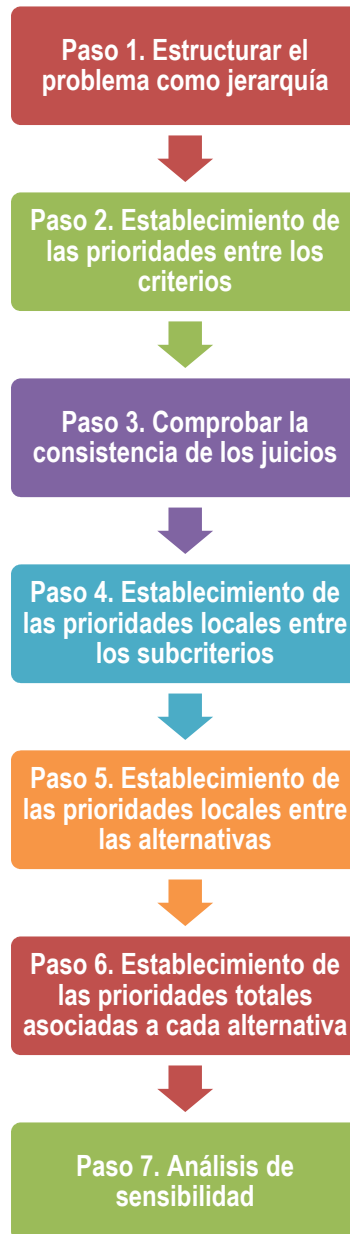


Figura 3.-Diagrama de flujo del proceso analítico jerárquico AHP

### ***Paso 1: Estructurar el problema como una jerarquía***

El método AHP comienza modelando el problema de toma de decisión a resolver como una jerarquía. De hecho el término “jerárquico” aparece en la denominación, porque es una de las principales características del método. La forma general que adopta una jerarquía se muestra en la

Figura 3. El objetivo a alcanzar se sitúa en el vértice superior de la jerarquía, consistiendo el problema de la toma de decisión en la elección de la alternativa que nos permita alcanzar dicho objetivo.

Por debajo de él, en el siguiente nivel, estarán los criterios. Éstos se corresponden a aspectos tales como: objetivos o parámetros que servirán para que el experto pueda argumentar sus preferencias. Por la propia naturaleza del proceso, la elección de los criterios es fundamental a la hora de tomar decisiones, porque una mala selección de los mismos pueden llegar a cuestionar todo el proceso de toma de decisión.

Establecidos los criterios, puede suceder que éstos se dividan a su vez en forma de jerarquía descendente, en otros subcriterios. En este proceso hay que analizar en profundidad el problema, a fin de tener una visión lo más completa y global del problema, sin olvidar que puede ser posible realizar algunas modificaciones, tener en cuenta el entorno y a las personas que rodean al problema o identificar aquellos criterios que contribuyan a la solución. El nivel más bajo de la jerarquía estará constituido por el conjunto de posibles alternativas, sobre las cuáles tendremos que tomar la decisión. El objetivo último del proceso analítico jerárquico es ser un instrumento de ayuda en el proceso de toma de decisiones para alcanzar la mejor solución de nuestro problema.

### ***Paso 2: Establecimiento de las prioridades entre los criterios***

La finalidad de este paso es fijar las prioridades, en forma de un vector de pesos, que determinen la importancia que se otorga a cada criterio. La elección del valor numérico, peso, que nos marque la preferencia de un criterio frente a otro es la clave de este proceso. El método AHP establece que estos valores numéricos se fijan de forma indirecta mediante una escala prefijada en la que el experto pueda efectuar una valoración del criterio de forma cualitativa. De esta manera la correspondencia, en forma de Tabla, entre la valoración cualitativa del experto y la asignación del valor es un paso previo a la determinación de los pesos (véase la Tabla 6).

El siguiente paso es establecer las prioridades comparando pares entre sí para poder determinar los pesos relativos de los criterios. Los números de la escala son la proporción en que cada uno de los elementos considerados en la comparación domina al otro en un criterio que tienen en común. Se seguirá el principio del axioma de comparación recíproca que establece que si el valor del elemento menor es el inverso del mayor, esto es si  $x$  es el número de veces que un elemento predomina sobre otro, entonces el valor de éste último es  $x^{-1}$ , verificándose que:  $x^{-1} \cdot x = x \cdot x^{-1} = 1$ .

| ESCALA NUMÉRICA  | ESCALA VERBAL                                    | EXPLICACIÓN   |
|------------------|--|---|
| 1                | Igual importancia                                | Dos actividades contribuyen por igual al objetivo                         |
| 3                | Importancia moderada de un elemento sobre otro   | La experiencia y el juicio están a favor de un elemento sobre otro        |
| 5                | Importancia fuerte de un elemento sobre otro     | Un elemento es fuertemente favorecido                                     |
| 7                | Importancia muy fuerte de un elemento sobre otro | Un elemento es muy dominante  |
| 9                | Extrema importancia de un elemento sobre otro    | Un elemento es favorecido por al menos un orden de magnitud de diferencia |
| 2, 4, 6, 8       | Valores intermedios entre dos juicios adyacentes | Se usan como compromiso entre dos juicios                                 |
| INCREMENTOS 0, 1 | Valores intermedios de incrementos               | Utilización para graduación más fina de juicios                           |

Tabla 6.-Escala fundamental de comparación [55]

Usando la escala fundamental el experto determina los pesos de los criterios, construyendo una matriz  $R$ , en la que el término  $r_{ij}$  representa la prioridad relativa entre el criterio  $C_i$  y el criterio  $C_j$  respecto al objetivo del problema. Este término será mayor, igual o inferior a uno dependiendo de cuál de los dos criterios sea más importante para el logro de la meta. La matriz obtenida es de la forma [56]:

$$R = \begin{pmatrix} 1 & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & 1 & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & 1 \end{pmatrix}$$

Donde  $r_{ij} \cdot r_{ji} = 1$ . Una matriz con esta propiedad se denomina *matriz recíproca*. Para establecer las prioridades de los criterios ( $w$ ), este método se emplean los valores propios y vectores propios de la matriz.

Si los pesos ( $w_i, i=1, 2, \dots, n$ ) son conocidos la matriz de comparaciones pareadas es:

$$W = \begin{pmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \dots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & w_n/w_n \end{pmatrix}$$

El vector de pesos se obtiene a partir de la resolución del sistema de ecuaciones:

Si se quisiera obtener el vector de pesos a partir de esta matriz se debe resolver el siguiente sistema de ecuaciones:

$$W \bullet w = \lambda \bullet w$$

$$W = \begin{pmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \dots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & w_n/w_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{pmatrix}$$

siendo  $\lambda$  es un valor propio de  $W$  y  $w$  el vector propio asociado. La matriz  $W$  tiene una forma especial, además de ser una matriz recíproca, su rango es uno porque cada fila es un múltiplo constante de la primera. Por ello esta matriz tiene un único valor propio distinto de cero. Como la suma de los valores propios de una matriz es igual a su traza (suma de los elementos de la diagonal principal) y todos los elementos de la diagonal principal son iguales a 1, entonces el único valor propio distinto de cero de  $W$  es igual a la dimensión de la matriz, es decir igual a  $n$  ( $\lambda = n$ ).

Se ve que la suma de los elementos de la matriz de cualquier columna  $j$  es igual a:

$$\frac{1}{w_j} \sum_{i=1}^n w_i = \frac{1}{w_j}$$

Por tanto, al normalizar la matriz  $W$  mediante la suma de las columnas, en cada una de ellas se obtiene el vector  $w$ , por lo que el promedio de cualquier fila  $i$  es igual a  $w_i$ .

Como los pesos no son conocidos y la matriz de comparaciones  $R$  se construye en base a las opiniones del experto, los que no tienen que ser necesariamente consistentes, la matriz  $R$  puede concebirse como una perturbación de la matriz  $W$ . Es posible que posea más de un valor propio no nulo. El máximo valor propio ( $\lambda_{max}$ ) está asociado a un vector propio  $z$ , que se considera una buena aproximación del vector de prioridades o pesos  $w$ . Puede escribirse, por lo tanto, como:

$$R \cdot \hat{w} = \lambda_{max} \hat{w}$$

A partir de estos conceptos [50] se estima el vector de pesos (vector propio) mediante el siguiente procedimiento:

1. Se obtiene la matriz normalizada ( $R_{Norm}$ ), dividiendo cada elemento de la columna  $j$ -ésima por la suma de todos los elementos de dicha columna:

$$R_{Norm} = \left[ r_{ijNorm} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^n r_{ij}} \right]$$

2. Se estima el vector de pesos ( $\hat{w}$ ) calculando el promedio de cada fila de la matriz normalizada. El vector  $\hat{w}$  de pesos será igual a:

$$\hat{w} = \left[ \hat{w}_1 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n r_{1jNorm}, \hat{w}_2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n r_{2jNorm}, \dots, \hat{w}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n r_{ijNorm}, \dots, \hat{w}_n = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n r_{njNorm}, \right]$$

### **Paso 3: Comprobar la consistencia de los juicios**

Si la matriz  $R$  fuera completamente consistente, 1, entonces  $\lambda_{max}$  sería igual a  $n$ . Sin embargo, el experto cometerá ciertas inconsistencias en sus juicios y es conveniente medir el grado de dichas inconsistencias, porque si dado que si las valoraciones no han sido cuidadosas, el vector de prioridades o pesos obtenidos puede ser poco representativo.

La consistencia puede medirse mediante el *índice de consistencia* (IC), definido como:

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

Esta medida puede utilizarse para mejorar la consistencia de los juicios comparándola con el índice de consistencia aleatorio (RI) recogido en la Tabla 7:

|           |   |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-----------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|
| <b>n</b>  | 2 | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
| <b>RI</b> | 0 | 0.58 | 0.90 | 1.12 | 1.24 | 1.32 | 1.41 | 1.45 | 1.51 |

Tabla 7.-Valores del índice de consistencia aleatorio (RI) para pequeños problemas [54]

El índice de consistencia aleatorio (RI) se define como el índice de consistencia aleatorio medio obtenido mediante la simulación de 100.000 matrices recíprocas [66] generadas aleatoriamente utilizando la escala de [50] (1/9, 1/8, ..., 1, ..., 8, 9).

Si se calcula el cociente entre el índice de consistencia (IC) y el índice de consistencia aleatorio (RI), es el ratio de consistencia (RC).

$$RC = \frac{IC}{RI} < 0.10$$

$RC \leq 0.10$  Consistencia razonable.

$RC > 0.10$  Inconsistencia.

Esta razón o cociente está diseñado de manera que los valores que exceden de 0.10 son señal de juicios inconsistentes; es probable que en estos casos el tomador de decisiones desee reconsiderar y modificar los valores originales de la matriz de comparaciones pareadas. Se considera que los valores de la razón de consistencia de 0.10 o menos son señal de un nivel razonable de consistencia en las comparaciones pareadas.

Para calcular el índice de consistencia el valor de  $\lambda_{\max}$  se obtiene de la ecuación:

$$R \bullet \hat{w} = \lambda_{\max} \hat{w}$$



Al multiplicar la matriz  $R$  por el vector  $\hat{w}$  se obtiene un vector columna, luego se divide cada componente de él por las del vector  $\hat{w}$  y se genera otro vector columna formado por los valores propios de la matriz  $R$ . Promediando dichos valores se obtiene  $\lambda_{max}$ .

***Paso 4: Establecimiento de las prioridades locales entre los subcriterios***

Si en el primer paso, hemos tenido que dividir alguno o todos los criterios, en otros subcriterios, se deben, antes de continuar, calcular el vector de pesos asociado a dichos subcriterios.

El proceso es similar al descrito en el paso anterior con la salvedad de que se deberán realizar las comparaciones pareadas entre subcriterios para determinar su importancia relativa respecto al criterio inmediatamente superior en la jerarquía. Así se podrá calcular el vector de pesos asociados a un conjunto de subcriterios respecto a su criterio "padre".

***Paso 5: Establecimiento de las prioridades locales entre las alternativas***

Una vez que en los pasos anteriores se ha obtenido la ponderación de los criterios y subcriterios, se puede proceder a valorar las alternativas y así calcular las correspondientes prioridades locales. Con cada criterio o subcriterio del último nivel de la jerarquía se planteará la matriz  $R$  de juicios por comparación pareada entre alternativas, siguiendo el procedimiento explicado en el paso 2, pero ahora se establece el nivel de prioridad de una alternativa sobre otra tomando como base de comparación el grado de cumplimiento o satisfacción de cada criterio o subcriterio. La escala a utilizar es la misma.

Una vez la matriz  $R$  de comparación entre alternativas se ha planteado se calculará el vector de pesos y el índice de consistencia de los juicios. Una vez realizadas estas operaciones, si el índice de consistencia es aceptable, para cada criterio o subcriterio se obtendrá un vector de pesos de las alternativas.

***Paso 6: Establecimiento de las prioridades totales asociadas a cada alternativa.***

Los vectores de prioridad de todas las alternativas respecto de cada subcriterio, así obtenidos, formarán una matriz, que se multiplicará por el vector de prioridad de los subcriterios respecto al criterio

del cual se desprenden. Ese será el vector de preferencias de cada alternativa con respecto a ese criterio. Se repetirá, para cada criterio, este procedimiento.

Se obtendrán tantos vectores de prioridad de las alternativas respecto de los criterios como criterios existan y con ellos se construirá una matriz que, multiplicada por el vector de prioridad de los criterios respecto del objetivo general, dará por resultado el vector de prioridades de cada alternativa respecto del objetivo principal, lo que permite determinar que alternativa es la más conveniente para la solución del problema planteado.

#### ***Paso 7: Análisis de sensibilidad.***

Para terminar se puede realizar un análisis de sensibilidad que confirme la robustez de los resultados, esto es, que no son debidos al azar.

Como último paso de la metodología AHP puede realizarse un análisis de sensibilidad que confirme que realmente los resultados obtenidos son robustos y no son fruto del azar.

La utilización de herramientas informáticas facilita y agiliza la realización de este análisis, que consiste en variar el valor de un peso y observar, numérica y gráficamente, como afecta esta variación al resto de los pesos y a la priorización de alternativas.

La realización de este análisis puede facilitarse y agilizarse si se emplea para ello herramientas informáticas de cálculo. Este análisis consiste en realizar variaciones en el valor de un peso y observar numérica y gráficamente cómo este cambio afecta al resto de los pesos del problema y a la priorización de alternativas.

### **3.3. Método TOPSIS. Selección de la mejor alternativa**

En esta sección se va a revisar el método TOPSIS en profundidad, ya que será uno de los métodos de decisión utilizado para seleccionar la mejor alternativa en el problema de la selección del trazado de una vía, junto con el método anteriormente ya descrito el AHP.

El método TOPSIS [57] es un método para múltiples atributos que identifica soluciones a partir de un conjunto finito de alternativas. El principio básico es que la alternativa elegida debe tener la distancia más corta a la solución ideal y la distancia más lejana a la solución no ideal.

En TOPSIS es donde se contemplan las sutilezas que el concepto de ideal tiene y se construye un método operativo [58]:

Partimos, de tener unas alternativas  $A_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$  y una matriz de decisión, con  $x_{ij} = U_j(A_i)$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$ . Donde  $U$  es la función utilidad del decisor. Podemos, sin pérdida de generalidad, transformar las utilidades de manera que todos los criterios sean a maximizar/minimizar y que todos los  $x_{ij} \geq 0$ .

- Se denomina punto ideal en  $(\mathfrak{R}^n)$  al punto  $A^M = (A_1^M, A_2^M, \dots, A_n^M)$ , donde  $A_i^M = \text{Max}_i x_{ij}$  para el caso de criterios de beneficio y  $A_i^M = \text{Min}_i x_{ij}$ , para el caso de criterios de coste. La alternativa  $A_M$  se llama *alternativa ideal*.
- Se denomina punto anti-ideal en  $(\mathfrak{R}^n)$  al punto  $A^m = (A_1^m, A_2^m, \dots, A_n^m)$ , donde  $A_i^m = \text{Min}_i x_{ij}$ , para el caso de criterios de beneficio y  $A_i^m = \text{Max}_i x_{ij}$ , para el caso de criterios de coste. La alternativa  $A_m$  se llama *alternativa anti-ideal*.

El método TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) [59] afronta el dilema de trabajar con el ideal, con el anti-ideal o con la mezcla de los dos. Para ver que esto es realmente un dilema, pues puede conducir a resultados diferentes, basta observar la siguiente Figura 4, en la que se han representado cinco alternativas (A, B, C, D y E) para un problema de dos criterios. También aparecen en la figura los puntos ideal y anti-ideal, respecto a los que es inmediato observar que C es la más próxima al ideal mientras que D es la más lejana del anti-ideal (en ambos casos utilizando una métrica de distancia euclídea y pesos iguales).

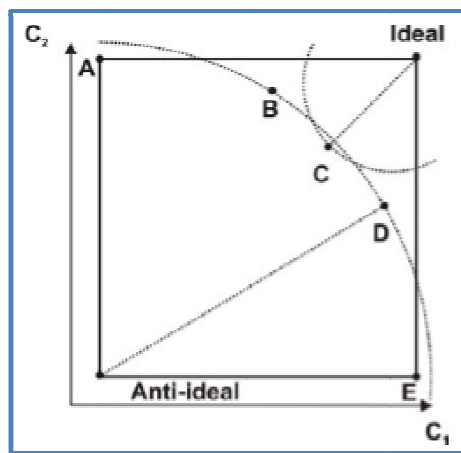


Figura 4.-Ilustración de distancias al ideal y al anti-ideal

TOPSIS resuelve el problema, inspirándose en una idea explicada por [60] que aplicó en un contexto de análisis multivariante de datos. Para cada alternativa  $A_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$ , se calculan  $d_p^M(A_i)$  y  $d_p^m(A_i)$ , las distancias ponderadas al ideal y al anti-ideal según la métrica  $p$  escogida:

$$d_p^M(A_i) = [\sum_j w_j^p |A_j^M - x_{ij}|^p]^{1/p}$$

$$d_p^m(A_i) = [\sum_j w_j^p |A_j^m - x_{ij}|^p]^{1/p}$$

A partir de las ecuaciones anteriores, se obtiene el ratio de similitud al ideal:

$$D_p(A_i) = \frac{d_p^m(A_i)}{d_p^M(A_i) + d_p^m(A_i)}$$

Que varía desde  $D_p(A^m) = 0$  para el anti-ideal, hasta  $D_p(A^M) = 1$  para el ideal. Finalmente,  $D_p(a_i)$  se utiliza para la ordenación final de las alternativas.

A continuación, se encuentra representada esquemáticamente los pasos del método TOPSIS, Figura 5.

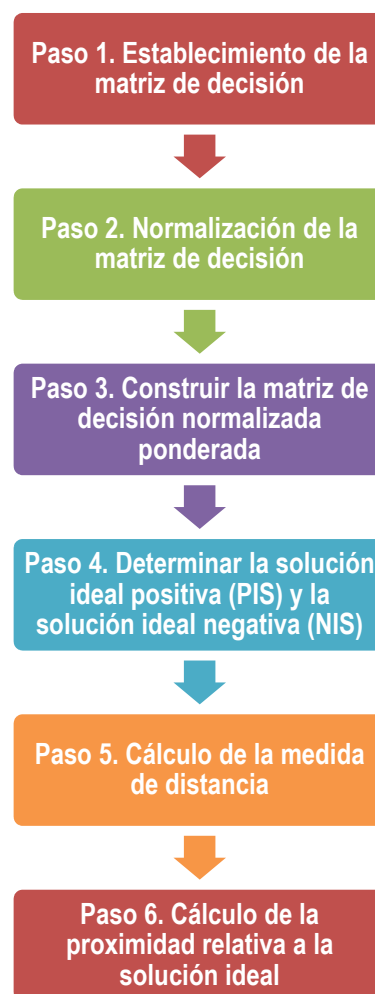


Figura 5.-Pasos del Método TOPSIS

**Paso 1:** Establecimiento de la matriz de decisión.

El método TOPSIS evalúa la siguiente matriz de decisión que se refiere a  $m$  alternativas  $A_i$ ,  $i=1, \dots, m$ , las cuales son evaluadas en función de  $n$  criterios  $C_j$ ,  $j = 1, \dots, n$ ,

|       | $w_1$    | $w_2$    | ... | $w_n$    |
|-------|----------|----------|-----|----------|
|       | $C_1$    | $C_2$    | ... | $C_n$    |
| $A_1$ | $x_{11}$ | $x_{12}$ | ... | $x_{1n}$ |
| $A_2$ | $x_{21}$ | $x_{22}$ | ... | $x_{2n}$ |
| ...   | ...      | ...      | ... | ...      |
| $A_m$ | $x_{m1}$ | $x_{m2}$ | ... | $x_{mn}$ |

Tabla 8.-Matriz de decisión

Donde  $x_{ij}$  denota la valoración de la  $i$ -ésima alternativa en términos del  $j$ -ésimo criterio. Y donde  $W = [w_1, w_2, \dots, w_n]$  es el vector de pesos asociado con  $C_j$ .

**Paso 2:** Normalización de la matriz de decisión.

En el método TOPSIS primero convierte las dimensiones de los distintos criterios en criterios no dimensionales. Un elemento  $\bar{n}_{ij}$  de la matriz de decisión normalizada  $N = [\bar{n}_{ij}]_{man}$  se calcula como sigue:

$$\bar{n}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^m (x_{ij})^2}} \quad j = 1, \dots, n; i = 1, \dots, m.$$

**Paso 3:** Construir la matriz de decisión normalizada ponderada

El valor normalizado ponderado  $\bar{v}_{ij}$  de la matriz de decisión normalizada ponderada  $V = [\bar{v}_{ij}]_{man}$  se calcula como:

$$\bar{v}_{ij} = w_j \times \bar{n}_{ij} \quad j=1, \dots, n, i=1, \dots, m$$

Donde,  $w_j$  tal que  $1 \in \sum_{j=1}^n w_j$  es el peso del  $j$ -ésimo atributo o criterio, si hablamos del caso crisp se verifica la igualdad. Es bien conocido que los pesos de los criterios en un problema de decisión

no tienen el mismo significado y no todos tienen la misma importancia. Estos pesos pueden obtenerse de diferentes modos: mediante asignación directa, mediante el método AHP.

**Paso 4:** Determinar la solución ideal positiva (PIS) y la solución ideal negativa (NIS)

El conjunto de valores positivo  $\bar{A}^+$  y el conjunto de valores ideal negativo  $\bar{A}^-$  se determina como:

$$\bar{A}^+ = \{\bar{v}_1^+, \bar{v}_2^+, \dots, \bar{v}_n^+\} = \left\{ \left( \max_i \bar{v}_{ij}, j \in J \right) \left( \min_i \bar{v}_{ij}, j \in J' \right) \right\} \quad i = 1, 2, \dots, m$$

$$\bar{A}^- = \{\bar{v}_1^-, \bar{v}_2^-, \dots, \bar{v}_n^-\} = \left\{ \left( \min_i \bar{v}_{ij}, j \in J \right) \left( \max_i \bar{v}_{ij}, j \in J' \right) \right\} \quad i = 1, 2, \dots, m$$

Donde  $J$  está asociado con los criterios de beneficio y  $J'$  está asociado con los criterios de costes.

**Paso 5:** Cálculo de la medida de distancia

La separación de cada alternativa de la solución ideal  $\bar{A}^+$  está dada como:

$$\bar{d}_i^+ = \left\{ \sum_{j=1}^n (\bar{v}_{ij} - \bar{v}_j^+)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad i = 1, 2, \dots, m$$

Y la separación de cada alternativa de la solución ideal negativa  $\bar{A}^-$  es como sigue:

$$\bar{d}_i^- = \left\{ \sum_{j=1}^n (\bar{v}_{ij} - \bar{v}_j^-)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad i = 1, 2, \dots, m$$

En este caso se utiliza la distancia euclídea m-multidimensional.

**Paso 6:** Cálculo de la proximidad relativa a la solución ideal

La proximidad relativa  $R_i$  a la solución ideal puede expresarse como sigue:

$$\bar{R}_i = \frac{\bar{d}_i^-}{\bar{d}_i^+ + \bar{d}_i^-}, \quad i = 1, 2, \dots, m$$

$$\bar{R}_i = 1 \Rightarrow A_i = \bar{A}^+$$

$$\bar{R}_i = 0 \Rightarrow A_i = \bar{A}^-$$

Cuanto más próximo es el valor de  $R_i$  a 1, implica una mayor prioridad de la alternativa  $i$ -ésima.

**Paso 7:** Ordenación de preferencias

Se ordenan las mejores alternativas de acuerdo con  $R_i$  en orden descendiente.

## **CAPÍTULO 4**

### **CASO DE ESTUDIO PARA LA SELECCIÓN DE UN TRAZADO DE UNA VÍA MEDIANTE MÉTODOS DE TDMC**

En este capítulo, se presenta el caso de estudio para la selección de un trazado de un vía mediante modelos de toma de decisión multicriterio. En concreto, se lleva a cabo la selección del trazado de la A-315 de Cuevas del Campo, teniendo en cuenta tres posibles trazados y considerando los 5 criterios que caracterizan a una vía: funcionalidad, planeamiento urbano, impacto ambiental, geotecnia y presupuesto. Para hacer esto, en primer lugar se exponen los conceptos necesarios del proyecto de selección del trazado de la A-315 de Cuevas del Campo. A continuación, se lleva a cabo el método AHP para establecer la relevancia de cada uno de los criterios y, posteriormente, se lleva a cabo el método TOPSIS y AHP, para identificar, entre las tres alternativas, la mejor de ellas, considerando la importancia de los criterios.

Finalmente, se hace una breve descripción de los datos más significativos del trazado de la vía, utilizando los métodos AHP y TOPSIS, y su comparación con otros métodos de toma de decisión multicriterio para la selección del trazado de la vía.

#### **4.1. Proyecto del trazado de una vía**

En el Capítulo 2, en la Sección 2.4, se indicaron las características que son necesarias definir para el trazado de una vía.



En esta sección, las características relacionadas con la selección del trazado la A-315 de Cuevas del Campo son resumidas a continuación. En detalle se pueden encontrar en [13].

### Datos básicos

El proyecto del trazado de una vía está situado en la carretera A-315 entre los puntos kilométricos 74+451 al 79+440, es una carretera de ubicación comarcal dentro del término municipal de Cuevas del Campo en la provincia de Granada.

Respecto a la topografía una de las características más peculiares del municipio es el carácter gradual de su orografía, desde la cota 700m en la orilla derecha del embalse del Negrátin y cauce del río Guadalentín, hasta los 1.001m que alcanza, al noreste.

### Estudio geológico

La zona se encuentra con una serie de accidentes geográficos: barrancos (cárcavas), collados, cerros, picos, etc., que van diseñando un relieve complejo y variado.

A la hora de explicar el estudio del trazado de una vía se debe tener en cuenta la sismología de la zona, ya que condiciona en cálculos posteriores a realizar. Para ello, se emplea la normativa descrita en [41] [42], y el mapa de peligrosidad sísmica.

Otro factor a tener en cuenta es el clima, el cual se encuentra influenciado por su orografía según donde esté ubicado el estudio de la vía. Su comportamiento se caracteriza a través de variables climatológicas como pueden ser la precipitación (lluvia, nieve), la temperatura, etc. Los datos climáticos generales necesarios para los estudios referidos a temperaturas medias, máximas y días de nieve; así como datos pluviométricos para el dimensionamiento de posibles obras de drenaje referidos a la precipitación, principalmente son proporcionados por la Agencia Estatal de Meteorología.

### Datos socioeconómicos

Hay que decir en este caso que más de la mitad de la población se dedica al sector de la agricultura y la construcción, siendo los sectores de industria de alimentación textiles y plásticos los que tienen menor número de población ocupada.

Es de destacar también los sectores de industria de alimentación, el de comercio, restaurantes y hostería y el de servicios.

### Tráfico y Planeamiento

Hablar del parámetro del tráfico es muy significativo, ya que con él se pretende conocer el tipo de circulación que atraviesa la red viaria de la zona de influencia del tramo de estudio, además se deben de analizar los valores de tráfico del tramo y su composición. Con todos los datos que se tienen que recopilar se procede a examinar el nivel de servicio y capacidad de la vía. Hay que tener también presente un estudio de accidentabilidad del tramo, con las posibles intersecciones o enlaces dependiendo del proyecto a estudiar. A continuación se enumeran algunos puntos que serán de interés a la hora hacer un estudio del tráfico: red viaria principal de la zona de estudio, pronosis del tráfico, capacidad y niveles de servicio, accidentabilidad de la zona de proyecto.

En la actuación del proyecto de estudio se puede invadir alguna zona de urbanismo del municipio en el que se tiene que analizar el Plan General de Ordenación Urbanística (PGOU) [2] a fin de conocer las normativas urbanísticas de los municipios afectados.

### Definición geométrica

En el momento que se quiere hacer cualquier modificación, desvío o mejora de un trazado de una vía, se adecuan una serie de elementos que tienen el cometido de mejorar la infraestructura existente cumpliendo con [35].

En la instrucción se define los parámetros de trazado de la vía a utilizar dependiendo de la velocidad de proyecto, la longitud mínima de alineación recta entre alineaciones curvas, la longitud máxima, los radios mínimos y máximos y peraltes a usar en el trazado de la vía.

También especifica las curvas de transición y las limitaciones respecto a los parámetros del alzado.

Con la instrucción se puede determinar los distintos elementos que conforman la sección tipo para el nuevo trazado de la vía de estudio como son: número de calzadas, número de carriles por ancho del carril, calzada mínima, arcenes mínimos, bermas mínimas.

### Estudio geotécnico

Es importe la realización de un estudio geotécnico de la zona en la que se vaya hacer el proyecto en nuestro caso el trazado de la vía, ya que es bueno saber que particularidades tiene el terreno sobre el que se va elaborar el trazado de la vía [4]. Se analizan las siguientes singularidades:

- Las características geotécnicas de los materiales.

- Condiciones de estabilidad de laderas, aspectos hidrológicos, tierra vegetal, espesor de suelos...
- Características y condiciones del terreno natural subyacente y características de la explanada.
- Condiciones del terreno para apoyo de terraplenes.

#### Movimiento de tierras

Se pretende compensar la cantidad de tierra que se tiene que quitar (puesto que sobra a la hora de la ejecución), con la cantidad de tierra que se debe poner (ya que falta para poder realizar la vía). Se define el tipo de explanada que está situada bajo el firme y sus características, los materiales que se van a emplear para la construcción, el núcleo del terraplén, la capa de transición y la de coronación y el talud que se va a tener tanto en desmonte como en terraplén.

Todo esto se puede determinar teniendo en cuenta el estudio geotécnico de los materiales que se hayan analizado anteriormente, como se ha visto en el apartado previo.

#### Firmes y pavimentos

El cálculo completo para seleccionar el paquete de firmes se especifica en [37]. Esto tiene un único fin, que la circulación de los usuarios sea lo más segura y cómoda posible.

En ocasiones se pueden determinar distintas soluciones para este punto, pero todas ellas son igual de optimas.

Se obtiene una categoría de tráfico y con la categoría resultante. Existen diferentes secciones o paquetes de firmes posibles. El realizar una u otras depende del coste que ello suponga.

#### Servicios afectados

Cuando hacemos cualquier tipo de obra o modificación por pequeña que sea, en nuestro caso el estudio de la selección del trazado de una vía, se pueden romper o deteriorar elementos colindantes a ella. Más aún se puede producir esta situación cuando se realiza un trazado de una nueva vía.

Una vez que se ha definido el trazado geométrico y sus dimensiones, se delimita la zona de ocupación de las obras, identificando los servicios que pueden interrumpirse o dañarse. Localizados estos, se realizan los trabajos tendentes a obtener los datos para proyectar la continuidad del servicio afectado, se hace un inventario donde se recoge toda la información.

### Expropiación

Al proceder a una obra de estas características se debe pensar que todo el suelo por donde va a pasar no es nuestro sino que es de otro propietario, entonces se tiene que proceder a hacer las convenientes expropiaciones.

Para determinar la zona a expropiar del trazado de una vía se tienen que seguir los criterios expuestos [43] en él se indica que la línea de expropiación se situará a 8m de distancia en autovías y 3m en la carretera, medidos en horizontal, de la arista exterior de la explanación, mediante una poligonal que evita la excesiva irregularidad natural de aquella, constituyendo la linde de la zona de dominio público.

Según el reglamento de la ley de expropiación forzosa se expropia toda la superficie necesaria para la ejecución y funcionamiento del proyecto.

### Estudio del impacto ambiental

En la actualidad se da importancia al impacto ambiental ya que todo lo referido al medio ambiente está siendo de mucha consideración. Esto quiere decir cómo va a estar de afectado el medio ambiente durante la ejecución del trazado de una vía, y cómo se va a quedar, que daños vamos a producir. Para esto se hace un análisis exhaustivo de la zona a tratar, una descripción del medio físico, caracterizando el clima a partir de los datos obtenidos de una serie de estaciones, dando datos de temperaturas y precipitaciones [3][45].

También se describen la disposición de los cauces, así como las series de vegetación potencial, diferenciadas en series zonales y azonales; además de la vegetación real. Tiene que ser objeto de estudio la fauna de la zona, asociada a los hábitats del área de estudio; así como del paisaje, ya que pueden dar lugar a connotaciones socioeconómicas.

Hay que elaborar, una identificación de impactos, donde se han de describir con profundidad, los impactos debidos a la contaminación atmosférica, el impacto acústico, los impactos sobre la geología y la geomorfología, los impactos sobre el suelo, sobre el paisaje, la hidrología, la vegetación y la fauna; todos ellos, tiene que ser descritos haciendo distinción entre los impactos producidos durante la fase de construcción y durante la fase de explotación.

A partir de los resultados estudiados en los apartados anteriores, se puede ver qué solución es más favorable desde un punto de vista ambiental, teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

geología, medio edáfico, hidrología, vegetación, fauna, paisaje, contaminación del aire, ruido, socioeconomía y patrimonio histórico.

### Presupuesto

En la vida cotidiana cuando se procede a la elaboración de una reforma, por ejemplo en nuestra casa se pide presupuesto en distintos sitios. Pues a la hora de hacer una obra de construcción de un trazado de una vía se tiene que desarrollar un presupuesto con una serie de particularidades.

El presupuesto del nuevo trazado de una vía se hace efectuando las mediciones de todas las partidas que componen nuestro estudio y multiplicadas por su precio unitario se obtiene el Presupuesto de Ejecución Material (PEM). El Real Decreto 1627/1.997 establece que el presupuesto de un estudio de seguridad y salud no será inferior al 2% del presupuesto de ejecución material, así que se toma ese 2% del PEM y se pasa a formar parte del mismo. Si añadimos al PEM los Gastos Generales, se toma como un 13% del PEM, y el Beneficio Industrial, se toma éste como un 6% del PEM, se tiene el Presupuesto de Ejecución por Contrata (PEC). El Presupuesto Base de Licitación (PBL) se obtiene añadiendo al PEC el IVA, que es del 21%. Finalmente, el Presupuesto para Conocimiento de la Administración (PCA) se obtiene sumándole al PBL el valor de las expropiaciones y los costes del proyecto y dirección de obra, siendo éstos últimos un 2% del PEM.

### Evaluación económica

Para realizar la evaluación económica se siguen los criterios descritos en [48]. Esta evaluación se hace para saber la rentabilidad del proyecto al cabo de los años de construcción. Se cogen una serie de pautas, como periodo de análisis se toma para el estudio del proyecto 30 años (vida útil) ya que así se puede despreciar el valor residual de la obra (<15%) para tasas de actualización bajas (< 6%).

Los costes de proyecto son los recursos reales escasos consumidos a lo largo de la vida útil. El coste de inversión se expresa en euros constantes del año en que se efectúa el análisis y se distribuya entre los años de ejecución del nuevo trazado de una vía.

Para evaluar los Gastos de Rehabilitación y Conservación se hace uso de las cifras que nos ofrece las recomendaciones para carreteras, que nos da una distribución de estos costes en el tiempo.

Los Beneficios son los derivados por la disminución de los costes generales de transporte al efectuar una determinada actuación. Se obtienen para cada año como diferencia entre los costes generales de transporte en la situación actual.

Los Costes de Transporte se pueden dividir en:

- Costes de funcionamiento que engloba los costes de amortización, mantenimiento, reparaciones y repuestos, consumo de combustibles, consumo de lubricantes, desgaste y reparación de cámaras y cubiertas (neumáticos).
- Costes del tiempo de recorrido.
- Coste de los accidentes.

Los Criterios e indicadores de rentabilidad económica. Tasa de actualización para determinarlos se necesitan conocer primero los costes y beneficios anuales del estudio de la vía. El coste anual ( $C_i$ ) del estudio del proyecto es la diferencia entre el coste de inversión, conservación y rehabilitación, de ese año. El beneficio anual ( $B_i$ ) del estudio del proyecto es la diferencia entre los costes de transporte (funcionamiento, tiempo y accidentes) para cada año. La serie de costes y beneficios se hacen en euros constantes del año que se realiza el estudio.

La tasa de actualización, es del 6% para proyectos de carreteras según las recomendaciones. Los indicadores de rentabilidad son los que a continuación se enumeran:

- VAN = Valor Actualizado Neto.
- B/C = Relación Beneficio/Coste.
- PRI = Periodo de Recuperación de la Inversión.
- TIR = Tasa Interna de Retorno.

Para que una nueva vía sea rentable económicamente se debe cumplir lo siguiente criterios de selección:

- $VAN > 0$ .
- $B/C > 1$ .
- $PRI < n$ , siendo  $n$  la vida útil (30 años).
- $TIR > r$ , siendo  $r$  la tasa de descuento mínima (6%).

A partir de la definición y desarrollo de las etapas que se siguen en la realización de la selección del trazado de la vía, se fijan los condicionantes que permiten estudiar el problema de toma de decisión para la selección del trazado de una vía.

Los métodos de toma de decisión multicriterio que utilizaremos para llevar a cabo la selección del mejor trazado de la vía son el método TOPSIS y AHP, los cuales se usarán para valorar las tres posibles alternativas, teniendo en cuenta los 5 criterios que caracterizan el trazado de la vía, y posteriormente se hará un estudio comparativo con otros métodos de TDMC para resolver el problema.

La Figura 6 resume el esquema que se va a llevar a cabo para resolver el caso de estudio y validar la alternativa escogida.

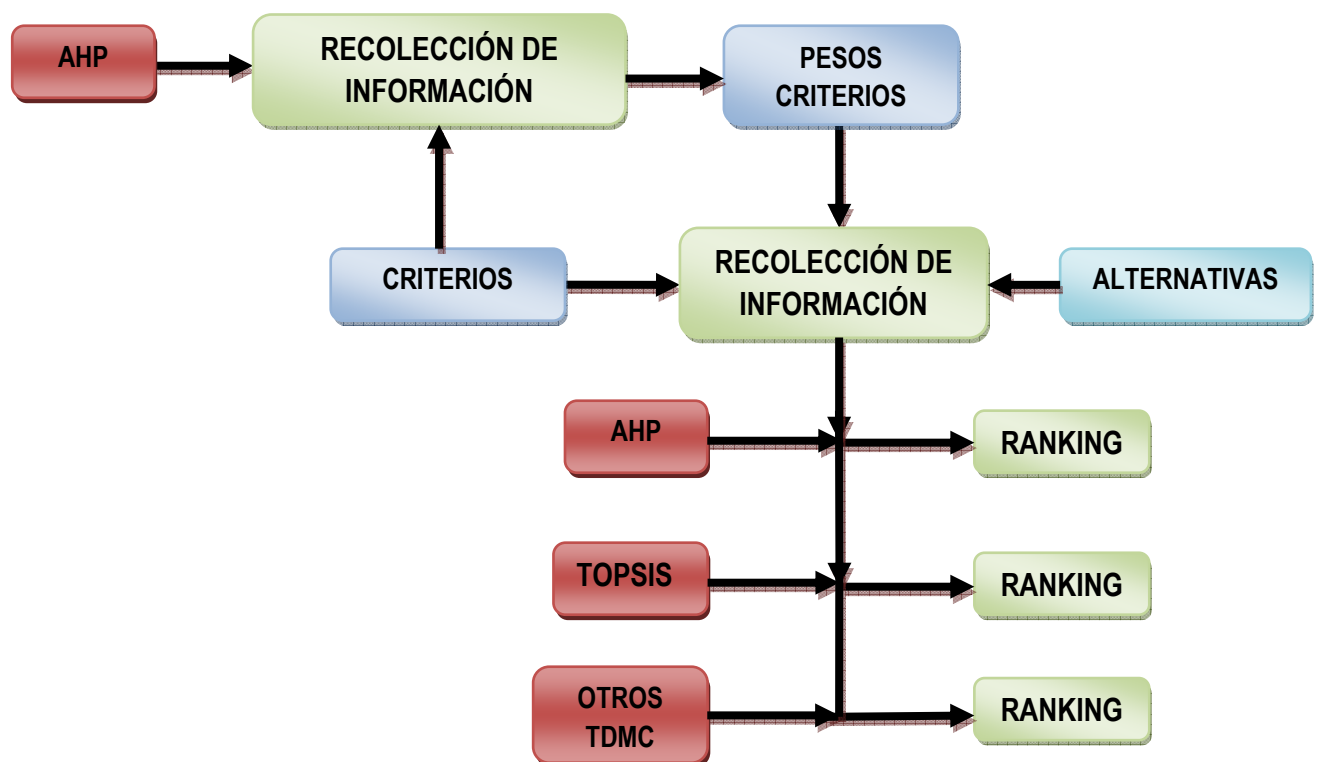


Figura 6.-Esquema de valoración de alternativas

#### 4.2. Cálculo del peso de los criterios por medio de AHP

En el problema de estudio del trazado de una vía, consiste en seleccionar el mejor trazado de las tres alternativas que se analizan, en nuestro caso de la carretera A-315 desde el PK 74+451 al PK 79+440 de la A-315 de Cuevas del Campo (Granada).

Se van a tener en cuenta una serie de factores relevantes, este proceso requiere que un experto proporcione evaluaciones respecto a la importancia relativa de cada uno de los criterios. En

esta sección se realiza una descripción de los criterios para continuar con el cálculo del peso de cada criterio.

#### 4.2.1. Descripción de los criterios

A continuación, se describe en detalle cada uno de los criterios que afecta cada uno de los criterios.

En cuanto a *la funcionalidad* es un conjunto de características que hacen que algo sea práctico y utilitario: por ejemplo en el diseño de este vehículo se ha buscado la funcionalidad. En nuestro caso en particular influye en una reducción de los tiempos, en el cual el vehículo recorre en menos tiempo una distancia entre dos puntos. Con este criterio también se aumenta la seguridad del usuario [1].

El siguiente criterio el *planeamiento urbanístico* es el conjunto de instrumentos técnicos y normativos que se redactan para ordenar el uso del suelo y regular las condiciones para su transformación o, en su caso, conservación PGOU (Plan General de Ordenación Urbana) determina el ámbito territorial de cada una de las distintas clases de suelo, ordena el suelo urbano, fija la regulación general del suelo urbanizable y establece las normas de protección del suelo no urbanizable [2]. Comprende un conjunto de prácticas de carácter esencialmente proyectivo con las que se establece un modelo de ordenación para un ámbito espacial, que generalmente se refiere a un municipio, a un área urbana o a una zona de escala de barrio.

El *impacto ambiental* es un criterio que se produce debido a la actividad humana sobre el medio ambiente. El concepto puede extenderse a los efectos de un fenómeno natural catastrófico. Las acciones de las personas sobre el medio ambiente siempre provocarán efectos colaterales sobre éste. La preocupación por los impactos ambientales abarca varios tipos de acciones, como la contaminación de los mares con petróleo, los desechos de la energía radioactiva, la contaminación acústica [3][45].

Por otro lado está el criterio de la *geotecnia* estudia la composición y propiedades de la zona más superficial de la corteza terrestre, para el asiento de todo tipo de construcciones y obras públicas. Aplicación de los métodos científicos y de los principios de ingeniería a la generación, interpretación y utilización del conocimiento de los materiales y procesos que ocurran en la corteza terrestre para la solución de problemas de ingeniería. Para su desarrollo requiere la aplicación de diferentes campos del conocimiento, entre ellos, la mecánica de suelos, la mecánica de rocas, la geología, la geofísica, la hidrología, la hidrogeología y las ciencias relacionadas [4].



Por último el *presupuesto* es el cálculo anticipado del coste de una obra o servicio. La rentabilidad económica es un factor a la hora de elegir un trazado de una carretera más adecuado en una inversión con fondos públicos [5][48].

4.2.2. Evaluación de la relevancia de los criterios

Una vez que se han definido los criterios, se realiza el análisis por pares, es decir se comparan cada criterio frente a cada uno de los criterios de manera biunívoca, es decir, par a par.

Esta comparación se realiza por medio de una escala de medidas. La propuesta [54], se basa en el rango 1 a 9 y consiste en la comparación de dos elementos que cuando son igualmente preferidos el decisor le asigna al par de elementos un «1»; si es moderadamente preferido se representa por «3», en el caso de fuertemente preferido por «5», muy frecuentemente preferida por «7», y extremadamente preferido por «9». Los números pares se utilizan para expresar situaciones intermedias. El objeto es calcular la prioridad de cada elemento.

|                          | Funcionalidad | Planeamiento Urbanístico | Impacto Ambiental | Geotecnia | Presupuesto |
|--------------------------|---------------|--------------------------|-------------------|-----------|-------------|
| Funcionalidad            | 1             | 9                        | 1/3               | 3         | 3           |
| Planeamiento Urbanístico | 1/9           | 1                        | 1/9               | 1/3       | 1/5         |
| Impacto Ambiental        | 3             | 9                        | 1                 | 5         | 5           |
| Geotecnia                | 1/3           | 5                        | 1/5               | 1         | 1/3         |
| Presupuesto              | 1/3           | 5                        | 1/5               | 3         | 1           |

Tabla 9.-Matriz de comparación por pares. Criterios

En la Tabla 9 se muestra la matriz de comparación por pares, criterios frente a criterios. A continuación analizamos par a par cada criterio determinando el peso dado según su preferencia. En cuanto a la *funcionalidad*: funcionalidad frente al planeamiento urbanístico, la funcionalidad tiene extrema preferencia respecto al planeamiento urbanístico con un valor 9. La funcionalidad respecto al tiempo que tarda en recorrer un vehículo la distancia entre dos puntos y la seguridad que aporta el trazado de una vía al usuario tiene más preferencia que el planeamiento, ya que no lo afectan y se adecua a él. Seguidamente se compara la funcionalidad respecto al impacto ambiental, tiene una preferencia moderada de un criterio a otro con un valor 1/3. Es más preferible el impacto ambiental respecto de la funcionalidad, debido a que éste es un criterio de gran preferencia a la hora de la

ejecución del trazado de una vía, ya que está no se realiza sin el perjuicio al medio ambiente. En cuanto a la funcionalidad contra geotecnia, tiene una preferencia moderada de un criterio sobre el otro con un valor 3. En este caso la funcionalidad posee más preferencia, puesto que la seguridad del usuario es más relevante, que las características del terreno que son similares en la zona. Por último la funcionalidad respecto al presupuesto, también posee una preferencia moderada de un criterio sobre el otro con un valor 3. El presupuesto desde un punto de vista económico parece preferible, la seguridad del usuario es más relevante.

El siguiente criterio de estudio es el *planeamiento urbanístico*: planeamiento urbanístico frente al impacto ambiental, se asigna una extrema preferencia de un criterio sobre el otro, con un valor 1/9. Ya se comentó anteriormente que cuando se construye un trazado de una vía, se realiza un perjuicio al medio ambiente, sin embargo el planeamiento urbanístico se adecua a lo establecido. En cuanto al planeamiento urbanístico respecto geotecnia, tiene una preferencia moderada de un criterio sobre el otro, con un valor 1/3. El planeamiento urbanístico al ser adecuado con la características de lo establecido, no resulta relevante frente a la geotécnica, está es un factor preferible sobre el planeamiento. Debido a que la geotecnia nos da la información de los materiales en los que va a estar apoyada la vía. Finalmente el planeamiento urbanístico contra presupuesto, posee una preferencia fuerte de un criterio sobre otro con un valor 1/5. El presupuesto es un criterio más relevante debido al gasto (dinero público) que se realizar en la elaboración de la vía, el planeamiento esta adecuado y no tiene preferencia.

En cuanto al *impacto ambiental*: impacto ambiental respecto geotecnia, este criterio tiene una preferencia fuerte de un criterio sobre el otro con un valor 5. El impacto ambiental sigue siendo relevante en el estudio, ya que es uno de los criterios preferibles, debido a que no se puede realizar la vía sin un perjuicio al medio ambiente. Seguidamente se compara el impacto ambiental frente presupuesto, posee una preferencia fuerte de un criterio sobre el otro con un valor 5. Lo que cuesta la vía tiene preferencia (dinero público), pero más relevante es el impacto ambiental, puesto que al realizar el trazado de la vía se destruirá parte del medio.

Por último la *geotecnia*: geotecnia respecto del presupuesto, tiene una preferencia moderada de un criterio sobre otro con un valor 1/3. En cuanto al presupuesto es relevante (dinero público) respecto de la geotecnia, al ser está semejante en la zona.

A continuación se comprueba la consistencia de los juicios. Si la matriz que se ha calculado fuera una matriz completamente consistente 1, entonces el  $\lambda_{max}$  sería igual a  $n$ . Sin embargo, el experto

ha cometido leves inconsistencias en sus juicios y resulta conveniente medir el grado de inconsistencia de los juicios emitidos por el decidor, dado que si no se ha sido cuidadoso con las valoraciones, el vector de prioridades o pesos obtenidos puede ser poco representativo.

La consistencia se puede medir mediante el *índice de consistencia* (IC), que tiene la siguiente expresión:

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

Se calcula la consistencia de los criterios. Para este cálculo se toma de la Tabla 7 el valor del índice de consistencia aleatorio para pequeños problemas es: RC=1.12 para la matriz (5x5) de comparación por pares de los criterios.

En la siguiente Tabla 10 se puede ver el resultado obtenido:

|        |        | $\lambda(\max)$ | IC            | RC=IC/RI      |
|--------|--------|-----------------|---------------|---------------|
| 1.3270 | 4.8999 | <b>5.2785</b>   | <b>0.1104</b> | <b>0.0986</b> |
| 0.1649 | 5.7737 |                 |               |               |
| 2.6185 | 5.3602 |                 |               |               |
| 0.3921 | 5.4744 |                 |               |               |
| 0.6861 | 4.8843 |                 |               |               |

Tabla 10.-Análisis de consistencia de los criterios

RC al ser menor de 0.10 es señal de un nivel razonable de consistencia en las comparaciones pareadas.

Después de haber realizado las comparaciones entre los criterios y haber comprobado la consistencia de los juicios, esta matriz es normalizada, es decir, se divide cada término de la matriz sobre la suma de sus columnas, y en cada caso se consigue una matriz como se presenta en la siguiente Tabla 11:

|                          | Funcionalidad | Planeamiento Urbanístico | Impacto Ambiental | Geotecnia | Presupuesto |
|--------------------------|---------------|--------------------------|-------------------|-----------|-------------|
| Funcionalidad            | 0.2093        | 0.3333                   | 0.1807            | 0.2432    | 0.3147      |
| Planeamiento Urbanístico | 0.0233        | 0.0370                   | 0.0602            | 0.0270    | 0.0210      |
| Impacto Ambiental        | 0.6279        | 0.3333                   | 0.5422            | 0.4054    | 0.5245      |
| Geotecnia                | 0.0698        | 0.1111                   | 0.1084            | 0.0811    | 0.0350      |
| Presupuesto              | 0.0698        | 0.1852                   | 0.1084            | 0.2432    | 0.1049      |

Tabla 11.-Matriz normalizada. Criterios

Con esta matriz, se obtiene el vector de pesos de los criterios al promediar los valores de las filas.

|                          |               |
|--------------------------|---------------|
| Funcionalidad            | 0.2563        |
| Planeamiento Urbanístico | 0.0337        |
| Impacto Ambiental        | <b>0.4867</b> |
| Geotecnia                | 0.0811        |
| Presupuesto              | 0.1423        |

Tabla 12.-Vector de pesos. Criterios

Si se analiza el valor 0.2563 que es el peso de la funcionalidad, éste se obtiene realizando el promedio de los resultados conseguidos respecto de la funcionalidad con los demás criterios que están incluidos en la Tabla 11.

Como se puede ver, el criterio más importante es el impacto ambiental, seguido de la funcionalidad, presupuesto, geotecnia y por último el menos importante el planeamiento urbanístico.

#### 4.3. Selección del trazado de una vía. Selección de Alternativas

Como se ha comentado en el punto anterior, el problema de estudio del trazado de una vía, consiste en seleccionar el mejor trazado. Ahora se va a realizar una pequeña descripción de las tres alternativas posibles para resolver el problema de nuestro caso de estudio del trazado de la vía.

Las alternativas al problema, se han estudiado desde la perspectiva de mejorar la infraestructura existente de la carretera de Cuevas del Campo de la A-315. Las tres soluciones propuestas se basan en la modificación del trazado de la vía para alejarlo de las zonas urbanas.

### **1. Alternativa 1**

La Alternativa 1 se separa de la A-315 en dirección Oeste evitando los núcleos de la Cañada de los Morteros y La Colonia. Se aleja de la zona urbana, rodea el polígono industrial y finalmente se une de nuevo a la A-315. La longitud del tramo de carretera es de 7.513,516m. Comienza a la cota 867m y se une de nuevo a la carretera antigua a la cota 786,5m.

### **2. Alternativa 2**

La Alternativa 2 comienza más cercana a la Cañada de los Morteros, evitando La Colonia y pasando cerca del núcleo urbano principal. Finalmente se une de nuevo a la A-315 justo a la altura del polígono industrial. La longitud de esta alternativa es de 4.655,968m. Las cotas de inicio es 827.918m y la de fin es 810m.

### **3. Alternativa 3**

La Alternativa 3 comienza en el mismo punto que la Alternativa 2 y acaba en el mismo punto de la Alternativa 1. La longitud de esta alternativa es de 5.865,911m.

En la Figura 7 se muestra una representación las tres alternativas.

En el caso de estudio de la selección del trazado de una vía, se tienen tres alternativas y se tiene que seleccionar una de ellas. Para poder determinar cuál de las tres alternativas es la mejor se han considerado los 5 criterios que son preferibles para dicha elección. Dichos criterios ya han sido descritos anteriormente, a continuación se enumeran: funcionalidad, planeamiento urbanístico, impacto ambiental, geotecnia y presupuesto. Cada uno de estos criterios tiene una preferencia. Así, por ejemplo al criterio de funcionalidad se da 0.26, planeamiento urbanístico 0.03, impacto ambiental 0.49, geotecnia 0.08 y presupuesto 0.14. El criterio que tiene más relevancia es el de impacto ambiental y el que menos el de planeamiento urbanístico.

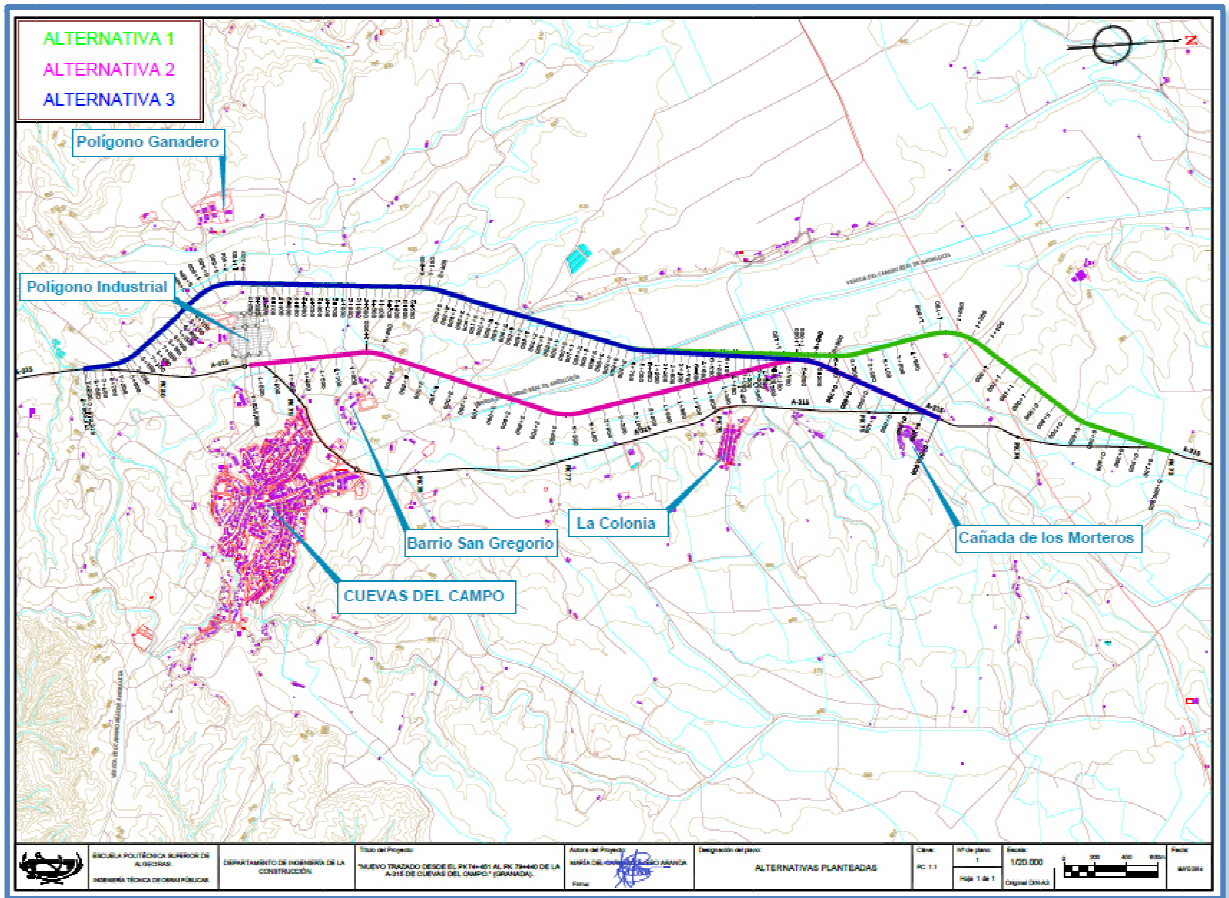


Figura 7.-Alternativas [13]

4.3.1. Selección del trazado de una vía. AHP.

4.3.1.1. *Recogida de la información*

Para cada criterio se va a determinar la preferencia a la hora de estudiar el problema de la selección del trazado de una vía a través de la comparación de criterios.

El primer criterio que se compara es el de **funcionalidad**, en este criterio se reducen los tiempos en el trayecto, entre dos puntos y por lo tanto hay una mayor seguridad del usuario.

En la siguiente Tabla 13 se muestra la matriz de comparación entre alternativas:

|               | ALTERNATIVA 1 | ALTERNATIVA 2 | ALTERNATIVA 3 |
|---------------|---------------|---------------|---------------|
| ALTERNATIVA 1 | 1             | 3             | 3             |
| ALTERNATIVA 2 | 1/3           | 1             | 2             |
| ALTERNATIVA 3 | 1/2           | 1/3           | 1             |

Tabla 13.-Matriz de comparación por pares. Criterio: funcionalidad

La alternativa 1 frente a la alternativa 2, tiene una preferencia moderada de una alternativa a otra con un valor 3, puesto que la alternativa 1 se aleja más de los núcleos de La Cañada de los Monteros, La Colina y rodea el polígono industrial. En cambio la alternativa 2 es peor ya que comienza más cerca de La Cañada de los Monteros y pasa cerca del núcleo principal urbano. La alternativa 1 respecto de la alternativa 3, posee una preferencia moderada de una alternativa a otra, con un valor 3. Por la misma razón anterior la alternativa 1 es más relevante, respecto de la alternativa 3, está comienza en el mismo punto de la alternativa 2, ya que se encuentra situada más cerca de la Cañada de los Monteros, aunque termina en el mismo punto que la alternativa 1.

La alternativa 2 frente a la alternativa 3, no se puede definir la preferencia de una alternativa sobre otra con un valor 2. Estas dos alternativas comienzan en la misma zona, y en cuanto a la ubicación respecto de La Cañada están a una distancia muy parecida, por eso se hace difícil su preferencia.

Ahora se calcula la consistencia para la determinación de la alternativa frente al criterio funcionalidad. Para este cálculo se toma de la Tabla 7 el valor del índice de consistencia aleatorio para pequeños problemas es:  $RC=0.58$  para la matriz (3x3) de comparación por pares de cada uno de los criterio, número de alternativas de decisión. Este valor será el mismo para el análisis de consistencia de los demás criterios.

|        |        | $\lambda(\max)$ | IC     | RC=IC/RI |
|--------|--------|-----------------|--------|----------|
| 1.7532 | 2.8123 | 3.0706          | 0.0353 | 0.0609   |
| 0.7220 | 3.0214 |                 |        |          |
| 0.4649 | 3.3781 |                 |        |          |

Tabla 14.-Análisis de consistencia criterio: funcionalidad

RC al ser menor de 0.10 es señal de un nivel razonable de consistencia en las comparaciones pareadas. Esta solución lleva a pensar que el decidor ha podido cometer algún error en sus juicios, pero estos errores se les consideran como consistentes, se admiten.

Por otro lado está el **planeamiento urbano**, este factor es el menos preferible de todos, ya que las tres alternativas se alejan del casco urbano y se adecuan al planeamiento, por ello no es un factor que se tenga mucho en consideración.

A continuación se compara el planeamiento urbanístico con cada alternativa como se representa en la Tabla 15:

|               | ALTERNATIVA 1 | ALTERNATIVA 2 | ALTERNATIVA 3 |
|---------------|---------------|---------------|---------------|
| ALTERNATIVA 1 | 1             | 3             | 1             |
| ALTERNATIVA 2 | 1/3           | 1             | 1/3           |
| ALTERNATIVA 3 | 1             | 3             | 1             |

Tabla 15.-Matriz de comparación por pares. Criterio: planeamiento urbanístico

La alternativa 1 respecto de la alternativa 2, posee una preferencia moderada de una alternativa a otra, con un valor 3. Estas dos alternativas cumplen con el planeamiento urbano ya que no lo afectan y se adecuan a él. En cambio la alternativa 2 se acerca un poco más al casco urbano. También se ve que la alternativa 2 respecto de la alternativa 3, tiene una preferencia moderada de una alternativa a otra, con un valor 1/3. El motivo es el mismo que el anterior, se acerca un poco más al casco urbano.

Se calcula la consistencia para este criterio, el resultado es el que se puede ver en la Tabla 16:

|        |        | $\lambda(\max)$ | IC     | RC=IC/RI |
|--------|--------|-----------------|--------|----------|
| 1.2857 | 3.0000 | 3.0000          | 0.0000 | 0.0000   |
| 0.4286 | 3.0000 |                 |        |          |
| 1.2857 | 3.0000 |                 |        |          |

Tabla 16.-Análisis de consistencia criterio: planeamiento urbanístico



Al ser RC igual a 0, la matriz es consistente. Se puede decir que el decidor no ha cometido errores en sus juicios.

El siguiente criterio de estudio es el **impacto ambiental**, en el caso del problema de la selección de una vía se considera una de las variables más preferibles, debido a la posibilidad de llevarla a cabo, sin realizar un perjuicio al medio ambiente.

En la Tabla 17 se ve la matriz de comparación:

|               | ALTERNATIVA 1 | ALTERNATIVA 2 | ALTERNATIVA 3 |
|---------------|---------------|---------------|---------------|
| ALTERNATIVA 1 | 1             | 1/5           | 1/2           |
| ALTERNATIVA 2 | 5             | 1             | 5             |
| ALTERNATIVA 3 | 2             | 1/5           | 1             |

Tabla 17.-Matriz de comparación por pares. Criterio: impacto ambiental

La alternativa 1 respecto de la alternativa 2, tiene una preferencia fuerte de una alternativa, con valor 1/5. Esta alternativa 2 tiene menos afección sobre el impacto ambiental, puesto que por ella pasan cultivos que no son de gran valor ambiental. En cambio en la zona de la alternativa 1 se encuentra plantada una especie autóctona. La alternativa 1 respecto de la alternativa 3, no se puede definir la preferencia de una alternativa sobre otra con un valor 1/2, debido a que por la alternativa 1, ya comentado antes, se encuentra plantada una especie autóctona. En la alternativa 3, hay que volver a plantar los arboles quitados para la ejecución del proyecto. En cuanto a la alternativa 2 respecto de la alternativa 3, se asigna una preferencia fuerte de una alternativa con un valor 5, puesto que por la alternativa 2 pasa por cultivos. Por último, en la alternativa 3 hay que volver a plantar los arboles que han sido dañados. Con todo lo descrito la alternativa 2 sigue siendo la más relevante.

Una vez definida la matriz de comparación se realiza el análisis de consistencia como se muestra en la siguiente Tabla 18:

|        |        | $\lambda(\max)$ | IC     | RC=IC/RI |
|--------|--------|-----------------|--------|----------|
| 0.3452 | 3.3774 | 3.0927          | 0.0463 | 0.0799   |
| 2.2542 | 3.2840 |                 |        |          |
| 0.5530 | 2.6166 |                 |        |          |

Tabla 18.-Análisis de consistencia criterio: impacto ambiental

RC al ser menor de 0.10 es señal de un nivel razonable de consistencia en las comparaciones pareadas. Esta solución lleva a pensar que el decidor ha podido cometer algún error en sus juicios, pero estos errores se les consideran como consistentes, se admiten.

Respecto al criterio de **geotecnia**, en el momento que se comienza a elaborar un proyecto de un trazado de una vía, es un factor a tener muy cuenta, en este caso lo es menos puesto que la zona de trabajo es muy homogénea en este aspecto. Debido a esto, las tres alternativas tienen el mismo valor 1.

En la Tabla 19 se muestra la comparación del criterio de geotécnica:

|               | ALTERNATIVA 1 | ALTERNATIVA 2 | ALTERNATIVA 3 |
|---------------|---------------|---------------|---------------|
| ALTERNATIVA 1 | 1             | 1             | 1             |
| ALTERNATIVA 2 | 1             | 1             | 1             |
| ALTERNATIVA 3 | 1             | 1             | 1             |

Tabla 19.-Matriz de comparación por pares. Criterio: geotecnia

A continuación se calcula la consistencia para este criterio:

ESTUDIO COMPARATIVO DE MODELOS DE TOMA DE DECISIÓN MULTICRITERIO PARA LA SELECCIÓN DEL TRAZADO DE UNA VÍA

|        |        | $\lambda(\max)$ | IC     | RC=IC/RI |
|--------|--------|-----------------|--------|----------|
| 1.0000 | 3.0000 | 3.0000          | 0.0000 | 0.0000   |
| 1.0000 | 3.0000 |                 |        |          |
| 1.0000 | 3.0000 |                 |        |          |

Tabla 20.-Análisis de consistencia criterio: geotecnia

Al ser RC igual a 0, la matriz es consistente. Esto quiere decir que el decidor no ha cometido errores en sus juicios.

Por último, el **presupuesto** del trazado de una vía, lo que va a costar ejecutar el trazado, tal y como se representa en la Tabla 21:

|               | ALTERNATIVA 1 | ALTERNATIVA 2 | ALTERNATIVA 3 |
|---------------|---------------|---------------|---------------|
| ALTERNATIVA 1 | 1             | 1/7           | 1/3           |
| ALTERNATIVA 2 | 7             | 1             | 5             |
| ALTERNATIVA 3 | 3             | 1/5           | 1             |

Tabla 21.-Matriz de comparación por pares. Criterio: presupuesto

La alternativa 1 respecto de la alternativa 2, tiene una preferencia muy fuerte de una alternativa con un valor 1/7, debido a que la alternativa 1 tiene una longitud mayor, comparándola con las demás alternativas, por esta razón su presupuesto es elevado. En cambio la alternativa 1 frente a la alternativa 3, su preferencia es moderada de una alternativa sobre otra. En cuanto a la alternativa 3 tiene una longitud mayor, pero no supera la longitud de la alternativa 1, por este motivo su presupuesto es menor que el de la alternativa 1. Por último la alternativa 2 respecto de la alternativa 3, posee una preferencia fuerte de una alternativa con un valor 5, esta alternativa es la de menor longitud y por ello es la que tiene menor presupuesto.

Se calcula el análisis de consistencia para este criterio que como se ve en la siguiente Tabla 22:

|        |        | $\lambda(\max)$ | CI            | RC=IC/RI      |
|--------|--------|-----------------|---------------|---------------|
| 0.2511 | 3.0137 | <b>3.0658</b>   | <b>0.0329</b> | <b>0.0567</b> |
| 2.2726 | 3.1411 |                 |               |               |
| 0.5878 | 3.0427 |                 |               |               |

Tabla 22.-Análisis de consistencia criterio: presupuesto

RC al ser menor de 0.10 es señal de un nivel razonable de consistencia en las comparaciones pareadas. Esta solución lleva a pensar que el decidor ha podido cometer algún error en sus juicios, pero estos errores se les consideran como consistentes, se admiten.

#### 4.3.1.2 Resolución del problema a través del método AHP

Después de realizar el análisis de consistencia y las comparaciones de todos los criterios, estas matrices son normalizadas, es decir, se divide cada término de la matriz sobre la suma de sus columnas, y en cada caso se obtendría una matriz como se presentan en las siguientes Tablas 22, 23, 24, 25 y 26.

|               | ALTERNATIVA1 | ALTERNATIVA2 | ALTERNATIVA3 |
|---------------|--------------|--------------|--------------|
| ALTERNATIVA 1 | 0.6000       | 0.6667       | 0.5000       |
| ALTERNATIVA 2 | 0.2000       | 0.2222       | 0.3333       |
| ALTERNATIVA 3 | 0.2000       | 0.1111       | 0.1667       |

Tabla 23.-Matriz normalizada. Criterio: funcionalidad

|               | ALTERNATIVA1 | ALTERNATIVA2 | ALTERNATIVA3 |
|---------------|--------------|--------------|--------------|
| ALTERNATIVA 1 | 0.4286       | 0.4286       | 0.4286       |
| ALTERNATIVA 2 | 0.1429       | 0.1429       | 0.1429       |
| ALTERNATIVA 3 | 0.4286       | 0.4286       | 0.4286       |

Tabla 24.-Matriz normalizada. Criterio: planeamiento urbanístico

**ESTUDIO COMPARATIVO DE MODELOS DE TOMA DE DECISIÓN MULTICRITERIO PARA LA SELECCIÓN DEL TRAZADO DE UNA VÍA**

|                      | <b>ALTERNATIVA1</b> | <b>ALTERNATIVA2</b> | <b>ALTERNATIVA3</b> |
|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| <b>ALTERNATIVA 1</b> | 0.1111              | 0.1429              | 0.0769              |
| <b>ALTERNATIVA 2</b> | 0.5556              | 0.7143              | 0.7692              |
| <b>ALTERNATIVA 3</b> | 0.3333              | 0.1429              | 0.1538              |

**Tabla 25.-Matriz normalizada. Criterio: impacto ambiental**

|                      | <b>ALTERNATIVA1</b> | <b>ALTERNATIVA2</b> | <b>ALTERNATIVA3</b> |
|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| <b>ALTERNATIVA 1</b> | 0.3333              | 0.3333              | 0.3333              |
| <b>ALTERNATIVA 2</b> | 0.3333              | 0.3333              | 0.3333              |
| <b>ALTERNATIVA 3</b> | 0.3333              | 0.3333              | 0.3333              |

**Tabla 26.-Matriz normalizada. Criterio: geotecnia**

|                      | <b>ALTERNATIVA1</b> | <b>ALTERNATIVA2</b> | <b>ALTERNATIVA3</b> |
|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| <b>ALTERNATIVA 1</b> | 0.0909              | 0.1064              | 0.0526              |
| <b>ALTERNATIVA 2</b> | 0.6364              | 0.7447              | 0.7895              |
| <b>ALTERNATIVA 3</b> | 0.2727              | 0.1489              | 0.1579              |

**Tabla 27.-Matriz Normalizada. Criterio: presupuesto**

Con cada vector de prioridad obtenido para los criterios, se conforma una matriz de prioridad la cual se multiplica matricialmente con el vector de prioridad obtenido al realizar la comparación entre los criterios Tablas 28, 29, 30, 31 y 32.

|                      |        |
|----------------------|--------|
| <b>ALTERNATIVA 1</b> | 0.5889 |
| <b>ALTERNATIVA 2</b> | 0.2519 |
| <b>ALTERNATIVA 3</b> | 0.1593 |

**Tabla 28.-Vector. Criterio: funcionalidad**

|                      |        |
|----------------------|--------|
| <b>ALTERNATIVA 1</b> | 0.4286 |
| <b>ALTERNATIVA 2</b> | 0.1429 |
| <b>ALTERNATIVA 3</b> | 0.4286 |

**Tabla 29.-Vector. Criterio: planeamiento urbanístico**

|               |        |
|---------------|--------|
| ALTERNATIVA 1 | 0.1103 |
| ALTERNATIVA 2 | 0.6797 |
| ALTERNATIVA 3 | 0.2100 |

Tabla 30.-Vector. Criterio: impacto ambiental

|               |        |
|---------------|--------|
| ALTERNATIVA 1 | 0.3333 |
| ALTERNATIVA 2 | 0.3333 |
| ALTERNATIVA 3 | 0.3333 |

Tabla 31.-Vector. Criterio: geotecnia

|               |        |
|---------------|--------|
| ALTERNATIVA 1 | 0.0833 |
| ALTERNATIVA 2 | 0.7235 |
| ALTERNATIVA 3 | 0.1932 |

Tabla 32.-Vector. Criterio: presupuesto

El resultado, es un vector denominado vector de prioridad de las alternativas, el cual se construye en la solución del problema, al presentar cada una de las alternativas y un tanto por uno de preferencia para cada una de ellas; para nuestro problema se tiene el vector de la Tabla 33.

|                      | CRITERIOS     |                          |                   |               |               |                       |
|----------------------|---------------|--------------------------|-------------------|---------------|---------------|-----------------------|
| ALTERNATIVAS         | Funcionalidad | Planeamiento Urbanístico | Impacto Ambiental | Geotecnia     | Presupuesto   | Puntuaciones Globales |
| ALTERNATIVA 1        | 0.5889        | 0.429                    | 0.110             | 0.333         | 0.083         | 0.2120                |
| ALTERNATIVA 2        | 0.2519        | 0.143                    | 0.680             | 0.333         | 0.724         | <b>0.5301</b>         |
| ALTERNATIVA 3        | 0.1593        | 0.429                    | 0.210             | 0.333         | 0.193         | 0.2579                |
| <b>Ponderaciones</b> | <b>0.2563</b> | <b>0.0337</b>            | <b>0.4867</b>     | <b>0.0811</b> | <b>0.1423</b> | 1.0000                |

Tabla 33.-Vector de prioridad de las alternativas

Según el resultado obtenido, la principal opción es la *alternativa 2* con 0.5301 seguidamente *alternativa 3* y la *alternativa 1*.

Cuanto más próximo es el valor de las puntuaciones globales a 1, implica una mayor prioridad de la alternativa.

Se establece el Ranking donde: **Alternativa 2 > Alternativa 3 > Alternativa 1.**

#### 4.3.2. Selección del trazado de una vía. TOPSIS

Vamos a resolver el problema de decisión a través del método TOPSIS, primero recogeremos la información necesaria del problema y, después, resolveremos el problema a través del método propuesto.

##### 4.3.2.1. Valoración de las alternativas

Los datos con los que contamos para este apartado son los que a continuación se muestran:

|               | Funcionalidad | Planeamiento Urbanístico | Impacto Ambiental | Geotecnia | Presupuesto |
|---------------|---------------|--------------------------|-------------------|-----------|-------------|
| Alternativa 1 | 9             | 10                       | 5                 | 7         | 1           |
| Alternativa 2 | 7             | 9                        | 8                 | 7         | 6           |
| Alternativa 3 | 8             | 10                       | 6                 | 7         | 2           |

Tabla 34.-Valoración de las alternativas para cada criterio

Esta información está recogida de un estudio hecho por un experto donde cada una de los criterios ha sido valorado en una escala numérica en el intervalo [0, 10], siendo la mejor puntuación 10 y la peor valoración 0 [13].

##### 4.3.2.2. Resolución del problema a través del método TOPSIS

A continuación se muestra la descripción para ir aplicando el método TOPSIS a nuestro caso de estudio.

El primer paso es establecer por parte del experto la matriz de decisión que se refiere a las tres alternativas. En la siguiente Tabla se muestra la matriz de valoración de las alternativas:

| CRITERIOS     | Funcionalidad | Planeamiento Urbanístico | Impacto Ambiental | Geotecnia | Presupuesto |
|---------------|---------------|--------------------------|-------------------|-----------|-------------|
| ALTERNATIVAS  | 0.26          | 0.03                     | 0.49              | 0.08      | 0.14        |
| Alternativa 1 | 9             | 10                       | 5                 | 7         | 1           |
| Alternativa 2 | 7             | 9                        | 8                 | 7         | 6           |
| Alternativa 3 | 8             | 10                       | 6                 | 7         | 2           |
| sum           | 24            | 29                       | 19                | 21        | 9           |
| max           | 9             | 10                       | 8                 | 7         | 6           |

Tabla 35.-Matriz de decisión

Donde los valores 0.26, 0.03, 0.49, 0.08 y 0.14 corresponden al vector de pesos asociado a los criterios que fue computado a través del método AHP.

El segundo paso es la normalización de la matriz de decisión. En el método TOPSIS primero convierte las dimensiones de los distintos criterios en criterios no dimensionales. Un elemento  $\bar{n}_{ij}$  de la matriz de decisión normalizada  $N = [\bar{n}_{ij}]_{man}$  se calcula como sigue:

$$\bar{n}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^m (x_{ij})^2}} \quad j = 1, \dots, n; i = 1, \dots, m.$$

|               | Funcionalidad | Planeamiento Urbanístico | Impacto Ambiental | Geotecnia | Presupuesto |
|---------------|---------------|--------------------------|-------------------|-----------|-------------|
| $a_{ij}^2$    | 0.26          | 0.03                     | 0.49              | 0.08      | 0.14        |
| Alternativa 1 | 81            | 100                      | 25                | 49        | 1           |
| Alternativa 2 | 49            | 81                       | 64                | 49        | 36          |
| Alternativa 3 | 64            | 100                      | 36                | 49        | 64          |
|               | 194           | 281                      | 125               | 147       | 101         |

Tabla 36.-Cuadrado de los valores



|               | Funcionalidad | Planeamiento Urbanístico | Impacto Ambiental | Geotecnia | Presupuesto |
|---------------|---------------|--------------------------|-------------------|-----------|-------------|
| $r_{ij}$      | 0.26          | 0.03                     | 0.49              | 0.08      | 0.14        |
| Alternativa 1 | 0.65          | 0.60                     | 0.45              | 0.58      | 0.10        |
| Alternativa 2 | 0.50          | 0.54                     | 0.72              | 0.58      | 0.60        |
| Alternativa 3 | 0.57          | 0.60                     | 0.54              | 0.58      | 0.80        |

Tabla 37.-Normalización de la matriz de decisión

Como se puede ver en la Tabla 37 para el valor 0.65 resulta de dividir 9 valor de la funcionalidad de la alternativa 1 entre la raíz de la suma de los cuadrados del la funcionalidad de las tres alternativas.

El tercer paso consiste en construir la matriz de decisión normalizada ponderada. El valor normalizado ponderado  $\bar{v}_{ij}$  de la matriz de decisión normalizada ponderada  $V = [\bar{v}_{ij}]_{man}$  se calcula como:

$$\bar{v}_{ij} = w_j \times n_{ij} \quad j=1, \dots, n, i=1, \dots, m$$

Donde,  $w_j$  tal que  $1 \in \sum_{j=1}^n w_j$  es el peso del j-ésimo atributo o criterio, si hablamos del caso crisp se verifica la igualdad. Es bien conocido que los pesos de los criterios en un problema de decisión no tienen el mismo significado y no todos tienen la misma importancia.

|               | Funcionalidad | Planeamiento Urbanístico | Impacto Ambiental | Geotecnia  | Presupuesto |
|---------------|---------------|--------------------------|-------------------|------------|-------------|
| $V_{ij}$      | 0.26          | 0.03                     | 0.49              | 0.08       | 0.14        |
| Alternativa 1 | 0.168002209   | 0.0178965                | 0.219134662       | 0.04618802 | 0.013930521 |
| Alternativa 2 | 0.130668385   | 0.01610685               | 0.350615459       | 0.04618802 | 0.083583124 |
| Alternativa 3 | 0.149335297   | 0.0178965                | 0.262961594       | 0.04618802 | 0.111444165 |

Tabla 38.-Matriz normalizada ponderada

En la Tabla 38 para saber el valor de la funcionalidad respecto de la alternativa 1 se multiplica el valor de 0.65 calculado anteriormente por 0.26 que es su peso.

El cuarto paso se elabora la determinación de la solución ideal positiva (PIS) y la solución ideal negativa (NIS).

$$\bar{A}^+ = \{\bar{v}_1^+, \bar{v}_2^+, \dots, \bar{v}_n^+\} = \left\{ \left( \max_i \bar{v}_{ij}, j \in J \right) \left( \min_i \bar{v}_{ij}, j \in J' \right) \right\} \quad i = 1, 2, \dots, m$$

$$\bar{A}^- = \{\bar{v}_1^-, \bar{v}_2^-, \dots, \bar{v}_n^-\} = \left\{ \left( \min_i \bar{v}_{ij}, j \in J \right) \left( \max_i \bar{v}_{ij}, j \in J' \right) \right\} \quad i = 1, 2, \dots, m$$

Donde  $J$  está asociado con los criterios de beneficio y  $J'$  está asociado con los criterios de costes.

|           | Funcionalidad | Planeamiento Urbanístico | Impacto Ambiental | Geotecnia  | Presupuesto |
|-----------|---------------|--------------------------|-------------------|------------|-------------|
| $V_{max}$ | 0.168002209   | 0.0178965                | 0.350615459       | 0.04618802 | 0.111444165 |
| $V_{min}$ | 0.130668385   | 0.01610685               | 0.219134662       | 0.04618802 | 0.013930521 |

Tabla 39.-Determinación PIS-NIS

En esta Tabla 39 se determina el valor máximo y mínimo de cada criterio, teniendo en cuenta los valores obtenidos en la Tabla 38.

El quinto paso es el cálculo de la medida de distancia.

La separación de cada alternativa de la solución ideal  $\bar{A}^+$  está dada como:

$$\bar{d}_i^+ = \left\{ \sum_{j=1}^n (\bar{v}_{ij} - \bar{v}_j^+)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad i = 1, 2, \dots, m$$

ESTUDIO COMPARATIVO DE MODELOS DE TOMA DE DECISIÓN MULTICRITERIO PARA LA SELECCIÓN DEL TRAZADO DE UNA VÍA

|                     | Funcionalidad | Planeamiento Urbanístico | Impacto Ambiental | Geotecnia | Presupuesto |             |             |
|---------------------|---------------|--------------------------|-------------------|-----------|-------------|-------------|-------------|
| $(V_{i,max} - V)^2$ | 0.26          | 0.03                     | 0.49              | 0.08      | 0.14        | sum         | $S_{max}$   |
| Alternativa 1       | 0             | 0                        | 0.0172872         | 0         | 0.009508911 | 0.026796111 | 0.163695177 |
| Alternativa 2       | 0.001393814   | 3.20285E-06              | 0                 | 0         | 0.000776238 | 0.002173255 | 0.046618182 |
| Alternativa 3       | 0.000348454   | 0                        | 0.0076832         | 0         | 0           | 0.008031654 | 0.089619493 |

Tabla 40.-Distancias  $A^+$

Por ejemplo el resultado 0.001393814 resulta de restar el valor máximo con cada valor de cada criterio de sus diferentes alternativas de la Tabla 38. El valor anterior es el resultado de: 0.168002209 menos 0.130668385.

Y la separación de cada alternativa de la solución ideal negativa  $\bar{A}^-$  es como sigue:

|                     | Funcionalidad | Planeamiento Urbanístico | Impacto Ambiental | Geotecnia | Presupuesto |             |             |
|---------------------|---------------|--------------------------|-------------------|-----------|-------------|-------------|-------------|
| $(V - V_{i,min})^2$ | 0.26          | 0.03                     | 0.49              | 0.08      | 0.14        | sum         | $S_{min}$   |
| Alternativa 1       | 0.001393814   | 3.20285E-06              | 0                 | 0         | 0           | 0.001397017 | 0.037376694 |
| Alternativa 2       | 0             | 0                        | 0.0172872         | 0         | 0.004851485 | 0.022138685 | 0.148790743 |
| Alternativa 3       | 0.000348454   | 3.20285E-06              | 0.0019208         | 0         | 0.009508911 | 0.011781367 | 0.108542007 |

Tabla 41.-Distancias  $A^-$

De la misma manera se hallaría la solución ideal negativa, pero teniendo en cuenta que se utiliza el valor mínimo.

El sexto paso es el cálculo de la proximidad relativa a la solución ideal.

La proximidad relativa  $R_i$  a la solución ideal puede expresarse como sigue:

$$\bar{R}_i = \frac{\bar{d}_i^-}{\bar{d}_i^+ + \bar{d}_i^-}, \quad i = 1, 2, \dots, m$$

$$\bar{R}_i = 1 \Rightarrow A_i = \bar{A}^+$$

$$\bar{R}_i = 0 \Rightarrow A_i = \bar{A}^-$$

Cuanto más próximo es el valor de  $R_i$  a 1, implica una mayor prioridad de la alternativa  $i$ -ésima.

|               | Ranking     |
|---------------|-------------|
| Alternativa 1 | 0.185887236 |
| Alternativa 2 | 0.761432687 |
| Alternativa 3 | 0.547745182 |

Tabla 42.-Matriz solución

Último paso ordenación de las preferencias

Establecemos el Ranking donde: **Alternativa 2 > Alternativa 3 > Alternativa 1.**

#### 4.3.3. Comparativa con otros métodos de toma de decisión multicriterio

Dentro de este capítulo hemos resuelto el problema para la selección del trazado de una vía mediante un estudio comparativo de dos modelos de toma de decisión multicriterio, que son: el método TOPSIS y AHP. En ambos métodos, la mejor alternativa escogida ha sido la alternativa 2.

Tal y como se ha descrito en el Capítulo 3, existen un gran abanico de métodos de toma de decisión multicriterio en la literatura, en este apartado vamos a utilizar algunos de estos métodos para resolver nuestro caso de estudio en la selección del trazado de una vía.

Modelo de suma ponderada (Weighted Sum Model, WSM) [10]. El modelo de la suma ponderada es el más empleado. Si hay  $m$  alternativas y  $n$  criterios, la mejor alternativa será la que satisfaga en el caso de maximización la siguiente expresión:

$$A_{WSM-score}^* = \max_i \sum_{j=1}^n a_{ij} w_j \text{ para } i=1,2,3,\dots,m$$

|               | Funcionalidad | Planeamiento Urbanístico | Impacto Ambiental | Geotecnia | Presupuesto | WSM  |
|---------------|---------------|--------------------------|-------------------|-----------|-------------|------|
|               | 0.26          | 0.03                     | 0.49              | 0.08      | 0.14        |      |
| Alternativa 1 | 9             | 10                       | 5                 | 7         | 1           | 5.79 |
| Alternativa 2 | 7             | 9                        | 8                 | 7         | 6           | 7.41 |
| Alternativa 3 | 8             | 10                       | 6                 | 7         | 2           | 6.16 |

Tabla 43.-Weighted Sum Model (Método de suma ponderada)

Establecemos el Ranking donde: **Alternativa 2 > Alternativa 3 > Alternativa 1.**

Modelo de producto ponderada (Weighted Product Model, WPM) [10]. El modelo del producto ponderado es muy similar al de suma pondera. La principal diferencia es que en vez de suma en el modelo hay multiplicación. Cada alternativa es comparada con las otras al multiplicar un número de cocientes; uno para cada criterio. Cada cociente es elevado a la potencia equivalente al peso relativo del criterio correspondiente.

$$R(A_k / A_L) = \prod_{j=1}^n (a_{Kj} / a_{Lj})^{w_{j=1}}$$

|               | Funcionalidad | Planeamiento Urbanístico | Impacto Ambiental | Geotecnia | Presupuesto |             |
|---------------|---------------|--------------------------|-------------------|-----------|-------------|-------------|
|               | 0.26          | 0.03                     | 0.49              | 0.08      | 0.14        | WPM         |
| Alternativa 1 | 9             | 10                       | 5                 | 7         | 1           | 4.877600177 |
| Alternativa 2 | 7             | 9                        | 8                 | 7         | 6           | 7.369124223 |
| Alternativa 3 | 8             | 10                       | 6                 | 7         | 2           | 5.699667904 |

Tabla 44.-Weighted Product Model (Método de producto ponderado)

Establecemos el Ranking donde: **Alternativa 2 > Alternativa 3 > Alternativa 1.**

Modelo de producto ponderada en relación con el conjunto mínimo (Weighted Product Model relative to minimum in the set) [11]. En este modelo se busca la minimización de la máxima desviación de entre todas las desviaciones posibles. A diferencia del modelo WGP que minimizaba la suma de las desviaciones, en este modelo lo que se minimiza es la desviación máxima.

|               | Funcionalidad | Planeamiento Urbanístico | Impacto Ambiental | Geotecnia | Presupuesto |             |
|---------------|---------------|--------------------------|-------------------|-----------|-------------|-------------|
|               | 0.26          | 0.03                     | 0.49              | 0.08      | 0.14        | WPM R       |
| Alternativa 1 | 9             | 10                       | 5                 | 7         | 1           | 1           |
| Alternativa 2 | 7             | 9                        | 8                 | 7         | 6           | 1.510809405 |
| Alternativa 3 | 8             | 10                       | 6                 | 7         | 2           | 1.168539384 |

Tabla 45.-WPM relative to minimum in the set (Con relación al mínimo del conjunto)

Establecemos el Ranking donde: **Alternativa 2 > Alternativa 3 > Alternativa 1.**

#### 4.4. Discusión de los resultados

En este capítulo con AHP se han obtenido los pesos de los criterios para saber la importancia de cada uno de los criterios en la resolución del problema. Una vez que se han hecho los cálculos, se ha obtenido que el criterio impacto ambiental es el que más peso tiene seguido de: funcionalidad, presupuesto, geotecnia y por último planeamiento urbanístico.

A continuación se ha resuelto el problema de la selección del trazado de una vía con varios métodos. En primer lugar, con el método AHP se ha realizado la selección de la mejor alternativa cuyo resultado ha sido la opción de la alternativa 2, seguida de la alternativa 1 y la alternativa 3.

Una de las ventajas del AHP es que proporciona un modelo único flexible para una gran gama de problemas. El AHP conduce a una **estimación completa de la utilidad** de cada alternativa, toma en consideración las prioridades relativas de los factores en un sistema y permite seleccionar la mejor alternativa, que el experto afine su definición del problema y así mejore su juicio y comprensión mediante la repetición del proceso. Así, se logra combinar todos los juicios u opciones en un todo, en el cual las alternativas quedan organizadas desde la mejor hasta la peor.

Este método presenta una serie de inconvenientes. En primer lugar, el número de valoraciones es muy elevado y que puede conllevar la inconsistencia. Las matrices de comparaciones por pares contienen juicios redundantes en el sentido de que en una matriz de tamaño  $(n \times n)$  se suelen emitir  $(n \times (n - 1)) / 2$  juicios cuando de hecho solo se necesitaran  $(n - 1)$  juicios. Otro problema que puede salir a la luz es el problema de la consistencia de los juicios, una vez que el decisor ha realizado sus juicios estos pueden ser que no sean los adecuados, ya que éste ha podido cometer ciertas inconsistencias en sus juicios y resulta conveniente medir el grado de inconsistencia de los juicios emitidos por el decisor, dado que si no ha sido cuidadoso con las valoraciones, el vector de prioridades o pesos obtenidos puede ser poco representativo. Se puede decir que en nuestro caso al no tener muchas alternativas y 5 criterios, los niveles de consistencia han sido adecuados.

Posteriormente, se ha llevado a cabo el cálculo con el método TOPSIS para seleccionar la mejor alternativa entre las tres alternativas que han sido evaluadas, obteniendo el siguiente resultado: primero la alternativa 2, alternativa 3 y por último la alternativa 1. El ranking no varía con respecto del resultado que se ha obtenido con el AHP.

Una de las ventajas que tiene este método es que no es necesario que los criterios sean comparables. En nuestro caso, este factor no ha sido relevante, ya que todos los criterios estaban

expresados en una escala numérica en el intervalo [0,10]. Al aplicar el método TOPSIS, si hemos tenido el beneficio de aplicar un método racional y comprensible, el cual permite la búsqueda de las mejores alternativas para cada criterio mostrándose en una forma matemática simple.

Este método requiere de menos valoraciones que el método AHP, ya que tan solo es necesario proporcionar  $n \times m$  valoraciones, es decir para cada criterio por cada alternativa. En este caso, no es necesario calcular la inconsistencia, ya que las alternativas se evalúan independientemente, en lugar de por comparaciones como es el caso de AHP.

Una vez ubicada toda la información en la matriz de valoración en el método TOPSIS, se dispone de los elementos suficientes para aplicar cualquiera de los métodos existentes que permiten calcular los coeficientes de cercanía de cada alternativa. A diferencia del método AHP que calcula un valor global para cada alternativa, el método TOPSIS computa un valor de cercanía en referencia a la solución ideal y no ideal.

Otro aspecto que debería tenerse en cuenta con el método TOPSIS es el problema del Rank Reverse [63]. Este problema viene dado por el cálculo de PIS y NIS, si se añaden o eliminan alternativas en el espacio de datos, las PIS y NIS podría tomar valores muy diferentes, ya que se podría dar el caso de que las alternativas añadidas o eliminadas tuvieran el valor máximo o mínimo para algún criterio.

Una vez que se ha llegado a la solución de la selección del trazado de la vía se ha hecho un estudio comparativo con otros métodos de TDMC para resolver el problema, cuyos resultados conseguidos son: para el modelo de suma ponderada (Weighted Sum Model, WSM) la alternativa elegida es la 2, 3 y por último la alternativa 1, para el modelo de producto ponderada (Weighted Product Model, WPM) la alternativa seleccionada es la 2, 3 y por último la alternativa 1, y para finalizar la comparación el último método utilizado ha sido el modelo de producto ponderada en relación con el conjunto mínimo (Weighted Product Model relative to minimum in the set) se escogería la alternativa 2, 3 y la alternativa 1.

|               | AHP | TOPSIS | WSM | WPM | WPM R |
|---------------|-----|--------|-----|-----|-------|
| Alternativa 1 | 3   | 3      | 3   | 3   | 3     |
| Alternativa 2 | 1   | 1      | 1   | 1   | 1     |
| Alternativa 3 | 2   | 2      | 2   | 2   | 2     |

Tabla 46.-Ranking de las alternativas para cada método

En la Tabla 47 se muestra un resumen del ranking de las alternativas para cada uno de los métodos. Se observa que no hay diferencia respecto al ranking del método AHP (Alternativa 2, 3 y 1) con los demás métodos (Alternativa 2,3 y 1). En los métodos WSM, WPM, WPM R se ha utilizado la misma información de TOPSIS, mientras que en AHP, si la información dada por el experto no ha sido cuidadosa, se puede cometer cierta inconsistencia en su juicio, ya que el vector de prioridades o pesos obtenidos puede ser poco representativo, en el caso de estudio no ha sido así, ya que se ha visto que el ranking de las alternativas han sido iguales.

En contra del método AHP y TOPSIS, con estos métodos de TDMC no es necesario recalcular ningún valor previo, si alguna de la alternativas es eliminada o añadida. Recordemos que el AHP modeliza mediante una jerarquía, y realiza comparaciones entre pares de elementos de ese nivel, en base a la importancia o contribución de cada uno de ellos, y en el TOPSIS la alternativa escogida debe ser aquella con la distancia más corta a la solución ideal positiva PIS y la distancia más lejana a la solución ideal negativa NIS.

Como conclusiones a este análisis, podemos indicar que cada método posee luces y sombras, por lo que es adecuado resolver el problema de selección de una vía a través de diferentes métodos y comparar los resultados obtenidos con el fin de avalar la solución que vamos a tomar.



## **CAPÍTULO 5**

### **CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO**

El interés de este trabajo fin de máster se centra en el proceso de selección del trazado de una vía donde es necesario realizar un análisis exhaustivo del conjunto de posibles trazados para seleccionar el mejor de ellos. Este análisis es similar al que se realiza en los problemas de toma de decisiones, en los que antes de tomar una decisión, se lleva a cabo un proceso de análisis que permite al decisor o a los decisores tomar decisiones de una forma coherente. Dicho análisis es el responsable de realizar un estudio metódico y analítico que ayuda a analizar las alternativas, criterios, etc., del problema que se está estudiando [61].

Dado la relación existente entre el problema del trazado de una vía y los problemas de toma de decisión, en primer lugar se ha realizado una revisión de Toma de Decisión y el problema del trazado de un vía. Posteriormente, se han revisado en profundidad los métodos más destacados para resolver.

El propósito del trabajo fin de máster ha consistido en el estudio comparativo de los modelos de toma de decisión multicriterio AHP y TOPSIS para fijar el peso de los criterios en el problema de decisión del trazado de una vía, y para seleccionar el mejor trazado entre un conjunto de trazados posibles para finalizar con un análisis comparativo con otros métodos de TDMC.

Por tanto, podemos concluir que los objetivos que nos marcábamos al inicio de este trabajo fin de máster han sido alcanzados, ya que se ha desarrollado una revisión sobre la toma de decisiones y su relación con el problema de selección del trazado de una vía, segundo se ha desarrollado el método de

decisión AHP para establecer el peso de los 5 criterios que intervienen en el problema de selección del trazado de una vía, tercero se ha desarrollado el método TOPSIS para seleccionar el trazado de una vía, en concreto en la A-315 de Cuevas del Campo, entre un conjunto de tres posibles trazados, desde el PK 74+451 al PK 79+440, donde se ha tenido en cuenta la importancia de los 5 criterios que han sido evaluados, cuarto se ha desarrollado el método AHP para seleccionar el trazado de una vía, en concreto en la A-315 de Cuevas del Campo, entre un conjunto de tres posibles trazados, se ha tenido en cuenta la importancia de los 5 criterios que han sido evaluados, y por último se ha hecho un estudio comparativo con otros métodos de TDMC para resolver el problema, estos métodos son: Modelo de suma ponderada (Weighted Sum Model, WSM), Modelo de producto ponderada (Weighted Product Model, WPM), Modelo de producto ponderada en relación con el conjunto mínimo (Weighted Product Model relative to minimum in the set).

Para resolver el problema de decisión de seleccionar el trazado de una carretera desde el PK 74+451 al PK 79+440 de la A-315 de Cuevas del Campo, se ha valorado los criterios que definen los trazados a través del método AHP con el fin de fijar su peso. Posteriormente, se ha valorado tres posibles trazados a través de los métodos TOPSIS por un lado y AHP por otro lado, ambos atendiendo al peso de los criterios computados anteriormente. Finalmente se ha elaborado un estudio comparativo con otros métodos de TDMC para resolver el problema.

Con todo esto podemos decir que la mejor alternativa para resolver nuestro problema de la selección del trazado de una vía es la *Alternativa 2*.

### **5.1. Líneas futuras de trabajo**

En base al trabajo realizado, en este apartado se exponen las líneas de trabajo futuros que podrían derivarse de los resultados de este trabajo.

En este trabajo fin de máster se ha utilizado para la elaboración de los cálculos tanto para el AHP y TOPSIS una hoja Excel, en otros trabajos futuros se podría usar software específicos tal y como Expert Choice [8] o Decern [64].

La información empleada para la resolución del problema de la selección de una vía ha sido exacta, es decir, valores numéricos expresados en el intervalo [0, 10]. Sería interesante realizar un estudio adecuado del tipo de información a utilizar para valorar cada criterio, por ejemplo, información

lingüística para aquellos criterios que pueden presentar imprecisión, como el impacto ambientales, o valores intervalares, por ejemplo, para valorar el presupuesto del proyecto.

Otra elemento a considerar podría ser la inclusión de otros métodos de decisión como son el ELECTRE, PROMETHE, MAUT, Scoring, con el fin de proporcionar un mayor abanico de métodos de TDMC para comparar los resultados.

También se podría realizar el análisis de sensibilidad, el cual consiste en realizar variaciones en el valor de un peso y observar numérica y gráficamente cómo este cambio afecta al resto de los pesos del problema y a la priorización de alternativas, para confirmar que los resultados obtenidos son robustos y no fruto del azar.

Por último otra línea de trabajo podría ser la intervención de un mayor número de expertos ya que en el caso de estudio del problema de la selección de una vía solo ha intervenido un solo experto.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] “Plan general de aforos y niveles de servicio”, (2013), Granada.
- [2] Alonso, F. (2009), “Plan General de Ordenación Urbanística de Cuevas del Campo” Normas Urbanísticas Tomo I, pp. 5-6.
- [3] “Ley 21/2013 de 9 diciembre de Evaluación Ambiente”.
- [4] Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de carreteras y Puentes PG3 y sus actualizaciones.
- [5] Real Decreto 1098/2001 de 12 de octubre por el que se aprueba el Reglamento General de la Ley de Contratos de las Administraciones Públicas, BOE del 26 de octubre y corrección de erratas en los BOE del 19 de diciembre de 2001 y 8 de febrero de 2002.
- [6] Osorio, J.C, Orejuela, J.P. (2008), “El proceso de análisis jerárquico (AHP) y la toma de decisiones multicriterio. Ejemplo de aplicación”. Scientia et Technica Año XIV, No 39, pp 247-252.
- [7] Pulgar Rubio, F.J. (2013), “Implementación del Método Topsis y nuevas operaciones de agregación para la herramienta “Flinstones””, EPS de Jaén, Proyecto Fin de Carrera Ingeniería en Informática, Septiembre, Jaén.
- [8] Toskano Hurtado, G.B. (2005), “El proceso de análisis jerárquico (AHP) como herramienta para la toma de decisiones en la selección de proveedores”, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Tesis, Lima.
- [9] Gómez-Limón, J.A., y Riesgo, L. “Utilidad multiatributo en el uso de los factores productivos. El caso del agua de riego”, E.T.S.II.AA. Universidad de Valladolid, Palencia.
- [10] Espinosa Sosa, S. (2010), “Aplicación de Modelos de Toma de Decisiones para la Adquisición de un Reactor Nuclear Avanzado en México”, Instituto Politécnico Nacional, Tesis, Junio, México, D.F.

- [11] Sánchez L, R. (2001), "La toma de decisiones con múltiples criterios: Un resumen conceptual y teórico, CEPLAG, Agosto, Bolivia.
- [12] Maurtua Ollaguez, D.E. (2006), "Criterios de Selección de Personal mediante el uso del proceso de análisis jerárquico. Aplicación en la selección de personal para la Empresa Exotic Foods S.A.C., Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima-Perú.
- [13] Tejero Aranda, M.C. (2014), "Nuevo trazado desde el Pk 74+451 al Pk 79+440 de la A-315 de Cuevas del Campo". (Granada), Proyecto Fin de Carrera, Universidad de Cádiz, Mayo, Algeciras.
- [14] Villegas, N. (2009), "Análisis de valor en la toma de decisiones aplicado a carreteras", Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
- [15] Chernoff, H. (1987), "Elementary decision theory", Dover Publications, New York.
- [16] Duncan, R and Raiffa, H. (1985), "Games and decision. Introduction and critical survey", Dover Publications, New York.
- [17] Triantaphyllou, E. (2000), "Multi-criteria decision making methods: a comparative study", Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London.
- [18] Choi, D.H., Ahn, B.S. and Kim, S.H. (2007), "Multicriteria group decision making under incomplete preference judgments: using fuzzy logic with a linguistic quantifier", International Journal of Intelligent Systems, 22(6), pp. 641-660.
- [19] Chuu, S.J. (2005), "Fuzzy multi-attribute decision-making for evaluating manufacturing flexibility", Production Planning and Control, 16(3), pp. 323-335.
- [20] Fodor, J. and Roubens, M. (1994), "Fuzzy preference modelling and multicriteria decision support", Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- [21] Fu, G. (2008), "A fuzzy optimization method for multicriteria decision making: an application to reservoir flood control operation", Expert Systems with Applications, 34(1), pp. 145-149.
- [22] Gheorghe, R.A., Bufardi, A. and Xirouchakis, P. (2005), "Fuzzy multicriteria decision aid method for conceptual design", Cirp Annals-Manufacturing Technology, 54(1), pp. 151-154.
- [23] Espinilla, M. (2009), "Nuevos Modelos de Evaluación Sensorial con Información Lingüística", Tesis Doctoral, Universidad de Jaén, febrero, Jaén.
- [24] Salminen, P, Hokkanen, J. and Lahdelma, R. (1998), "Comparing multicriteria methods in the context of environmental problems", European Journal of Operational Research, 104(3), pp. 485-496.
- [25] Dubois, D. and Prade, H. (1980), "Fuzzy sets and systems: theory and applications", Academic Press, New York.
- [26] Zadeh, L.A. (1965), "Fuzzy sets. Information and Control", 8(3), pp. 338-353.

- [27] Dubois, D. and Prade, H. (1990), "Rough fuzzy-sets and fuzzy rough sets", *International Journal of General Systems*, 13(2)(3), pp. 191-209.
- [28] Saint, S. and Lawson, J.R. (1994), "Rules for reaching consensus. A modern approach to decision making", Jossey-Bass, San Francisco.
- [29] "Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) de la Dirección General de Carreteras y Caminos Vecinales", Orden Ministerial de 21 de enero de 1988, modificada por las Órdenes Ministeriales de 8 de mayo de 1989 y de 28 de Septiembre de 1989.
- [30] "Reglamento General de la Ley de Contratos de las Administraciones Públicas", Real Decreto 1098/2001, de 12 de octubre.
- [31] "Pliego de Cláusulas Administrativas Generales para la contratación de obras del Estado", Decreto 3854/1970, de 31 de diciembre.
- [32] "Ley 8/72, de 10 de mayo, sobre construcción, conservación, y explotación de las autopistas en régimen de concesión".
- [33] "Instrucción para la recepción de cementos (RC-08)", Real Decreto 956/2008 de 6 de junio.
- [34] "Instrucción de hormigón estructural (EHE-08)", Real Decreto 1247/2008, de 18 de julio.
- [35] "Instrucción de Carreteras, Norma 3.1-IC", Orden Ministerial de 27 de diciembre de 1999, modificada por Orden Ministerial de 13 de septiembre de 2001.
- [36] "Instrucción 5.2-IC, Drenaje Superficial", Orden Ministerial de 14 de mayo de 1990.
- [37] "Instrucción 6.1-IC, Secciones de Firme", Orden Ministerial de 28 de noviembre de 2007.
- [38] "Instrucción 8.1-IC, Señalización Vertical", Real Decreto 1630/1992, modificado por el Real Decreto 1328/1995.
- [39] "Normas 8.3-IC para señalización de obras en las carreteras", Publicación del M.O.P.T.M.A., 1994.
- [40] "Instrucción 8.3-IC, Señalización, balizamiento, defensa, limpieza y terminación de las obras fijas fuera de poblado", O.C. 21.608 de 31 de agosto de 1987.
- [41] "Norma sismorresistente NCSE-02, Parte General y Edificación", Real Decreto 997/2002 de 27 de septiembre.
- [42] "Norma sismorresistente NCSP-07, Puentes", Real Decreto 637/2007, de 18 de mayo.
- [43] "Reglamento General de Carreteras", aprobado por el Real Decreto 1812/1994, de 2 de Septiembre, modificado por el Real Decreto 114/01, de 9 de Febrero.
- [44] "Real Decreto legislativo 1/2008 de 11 de Enero, por el que se aprueba el texto refundido de la ley de evaluación de Impacto Ambiental de Proyectos".
- [45] "Ley 26/07 de 23 de Octubre de responsabilidad medioambiental".

- [46] “Real Decreto 105/08 de 1 de Febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y de demolición”.
- [47] “Real Decreto 1481/01 de 27 de Diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertederos”.
- [48] “Recomendaciones para la evaluación económica, coste-beneficio, de estudios y proyectos de carreteras actualización de la previsión del tráfico, valor del tiempo, costes de accidentes y combustibles” del servicio de planeamiento del MOPTMA del año 1992.
- [49] Mellinas Fernandez, M.J. (2012), “Análisis Comparativo de Técnicas de Generación Eléctrica; AHP y Topsis Fuzzificado”, Universidad Politécnica de Cartagena, Proyecto Fin de Carrera Ingeniería Industrial, Septiembre, Cartagena.
- [50] Saaty, T. (1980), “The analytic hierarchy process”, McGraw-Hill, New York.
- [51] Saaty, T. (1994), “Fundamentals of decision making and priority theory”, RWS Publications, Pittsburgh.
- [52] Bryson, N. and Mobolurin, A. (1994), “An approach to using The analytic Hierarchy for solving multiple criteria decision making problems”, European Journal of Operational Research.
- [53] Ho, W., Dey, P.K. and Higson, H. (2006), "Multiple criteria decision-making techniques in higher education," International Journal of Educational Management, vol. 20, no. 5, pp. 319-337.
- [54] The Analytic Hierarchy Process. Disponible en [http://www.dii.unisi.it/~mocenni/Note\\_AHP.pdf](http://www.dii.unisi.it/~mocenni/Note_AHP.pdf) [Consultado el 4 de marzo de 2015].
- [55] Saaty, T. (1990), “An exposition of the AHP. In reply to the paper”, “Remarks on the analytic hierarchy process”, Management science, vol. 36, no. 3, pp. 259-268.
- [56] García Cascales, M.S. (2009), “Métodos para la comparación de alternativas mediante un Sistema de Ayuda a la Decisión (S.A.D.) y “Soft Computing””, Universidad Politécnica de Cartagena, Tesis Doctoral, Cartagena.
- [57] Gui-Wu Wei. (2009), “Extension of TOPSIS method for 2-tuple linguistic multiple attribute group decision making with incomplete weight information”, Springer-Verlag.
- [58] Barba-Romero and Pomerol, J. (1997), “Decisiones Multicriterio, Fundamentos Teóricos y Utilización”, Práctica Servicio de Publicaciones de la Universidad de Alcalá, Madrid.
- [59] Hwang, C.L. and Yoon, K. (1981), “Multiple Attribute Decision Methods and Applications”, Springer, Heidelberg, Berlin.
- [60] Dasarthy, B.V. (1976), "Smart: Similarity measured anchored ranking technique for the analysis of multidimensional data," IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol. SMC-6, no. 10, pp. 708-711.

- [61] Villegas Flores, N. (2009), "Análisis de valor en la toma de decisiones aplicado a carreteras", Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Enero, Barcelona.
- [62] Osorio Gómez, J.C., Herrera Umaña, M.F. y Vinasco, M.A (2008), "Modelo para la evaluación del desempeño de los proveedores utilizando AHP", Ingeniería & Desarrollo, no. 23, Enero-Junio.
- [63] Ceballos, B., Lamata, M.T., Pelta, D. y Sánchez, J.M. (2013), "El método TOPSIS relativo vs. Absoluto", Revista Electrónica de Comunicaciones y Trabajos de ASEPUMA. Rect@, vol14, pp. 181-192.
- [64] Convertino, M., Baker, K.M., Vogel, J.T., Lu, C., Suedel, B. and Linkov, I. (2013), "Multi-criteria decision analysis to select metrics for design and monitoring of sustainable ecosystem restorations", Ecological Indicators no. 26, pp. 76-86.
- [65] Jimenez Bolivar, J.F., Berbel Vecino, J. y Torrico Herruzo, M. (2001), "Análisis de la toma de decisiones de los agricultores ante cambios en el precio del agua. Modelos de decisión multicriterio", Estudios Agrosociales y Pesqueros, no. 190, pp. 65-99.
- [66] Aguarón, J. and Moreno – Jimenez, J. (2003), "The geometric consistency index: Approximated thresholds", European Journal of Operational Research, vol. 147, no. 1, pp. 137-145.