



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

**DEPARTAMENTO DE FÍSICA APLICADA**

**TESIS DOCTORAL**

**Selección de técnicas de restauración en desmontes  
de infraestructuras viarias**

Presentada por:

**José Luis Morera Escrich**

Dirigida por:

**Dr. Manuel Guzmán Martín Utrillas**

**Dr. Jorge Curiel Esparza**

**Dr. Julián Cantó Perelló**

Valencia, Octubre de 2015.



## **DEDICATORIA**

A mis padres, Marujín y José Luis

A Raffaella, Alessia y Chiara



## RESUMEN

La diversidad biológica es nuestro capital natural, y es de ello de donde viene la mayor parte de cuanto sostiene nuestras economías. Esto hace que su degradación, es decir, la pérdida de tal diversidad biológica, sea una de las amenazas ambientales globales más críticas de cuantas existen hoy día. Así pues, el problema de la degradación y fragmentación de ecosistemas es uno de los mayores riesgos para aquélla. 'Nuestro seguro de vida, nuestro capital natural: una estrategia de diversidad biológica de la Unión Europea hasta 2020' fue establecida por la Comisión Europea en mayo de 2011, y posteriormente refrendada por el Parlamento Europeo en 2012, para invertir la pérdida de diversidad biológica y acelerar la transición de la Unión Europea hacia una economía sostenible. En base a lo dicho, y como así se recoge en el documento citado, la Unión Europea, a través de la Comisión y el Parlamento, ha decidido que es necesario restaurar al menos el 15 por ciento de los ecosistemas degradados antes del año 2020.

El problema puede ser tratado a diferente escala, siendo habitual un enfoque del mismo a gran escala durante las etapas de planificación más iniciales. Pero es también necesario estudiar la restauración a pequeña escala, como así, por ejemplo, se desprende de la acción 6b de Estrategia de Diversidad Biológica de la Unión Europea hasta 2020. Y es a esa escala donde pone el enfoque la presente tesis, fijándose en la problemática asociada a la restauración de grandes desmontes de infraestructuras viarias existentes y, en especial, de carreteras. Es así que se ha planteado, de un lado, encontrar el peso más adecuado para los criterios manejados en la selección de alternativas de restauración. De otro, jerarquizar las opciones de restauración para un caso abierto, esto es, para aquellas ocasiones en las que no haya un criterio muy prevalente sobre el resto que, de forma natural, decante la selección.

Esta tesis presenta un sistema de ayuda a la decisión, fruto de la combinación de varias metodologías como son el método de expertos Delphi, y los métodos multicriterio AHP y VIKOR. El sistema creado es capaz de combinar criterios ambientales y territoriales con otros tradicionalmente más usados, como son los técnicos y económicos.

## RESUM

La diversitat biològica és el nostre capital natural, i és d'açò d'on ve quant sosté les nostres economies. Açò fa que la seua degradació, açò és, la pèrdua de diversitat biològica, siga una de les amenaces ambientals globals més crítiques de quantes existeixen hui dia. Així doncs, el problema de la degradació de paisatge (en tant es degraden els seus components ambientals) i la fragmentació d'ecosistemes, és ú dels majors riscos per a la citada diversitat biològica. 'La nostra assegurança de vida, el nostre capital natural: una estratègia de diversitat biològica de la Unió Europea fins a 2020' va ser establida per la Comissió Europea al maig de 2011, i posteriorment confirmada pel Parlament Europeu en 2012, per a invertir la pèrdua de diversitat biològica i accelerar la transició de la Unió Europea cap a una economia sostenible i verda. Sobre la base del que s'ha dit, i com així s'arregla en el document citat, la Unió Europea, a través dels seus organismes fonamentals com són la Comissió i el Parlament, ha decidit que és necessari restaurar al menys el 15 per cent d'ecosistemes degradats abans de l'any 2020.

El problema pot ser tractat a diferent escala, sent habitual un enfocament del mateix a gran escala, durant les etapes de decisió més inicials. Però és també necessari estudiar la restauració a xicoteta escala, com així, per exemple, es destil·la de l'acció 6b d'Estratègia de Diversitat Biològica de la Unió Europea fins a 2020. I és en eixa escala on posa l'enfocament el present treball de recerca, fixant-se en la problemàtica associada a la restauració de grans desmuntats d'infraestructures viàries existents i, especialment, de carreteres. És així que s'ha plantejat, d'un costat, trobar el pes més adequat per als criteris que entren en joc a l'hora de seleccionar les alternatives de restauració de tals desmuntats. D'un altre, jerarquitzar les opcions de restauració per a un cas general, açò és, per a aquelles ocasions en les quals no hi haja un criteri molt prevalent sobre la resta que, de forma natural, decante la selecció.

Aquest treball presenta un sistema d'ajuda a la decisió, fruit de la combinació del mètode d'experts Delphi i AHP amb VIKOR. El sistema creat és capaç de combinar criteris ambientals i territorials amb uns altres tradicionalment més usats, com són els tècnics i econòmics.

**SUMMARY**

Biodiversity is our natural capital, delivering ecosystem services that underpin our economy. This makes biodiversity degradation one of the most critical global environmental threats. 'Our life insurance, our natural capital: an European Union biodiversity strategy to 2020' was established by the European Commission in May 2011 for reversing biodiversity loss and speeding up the EU's transition towards a resource efficient and green economy. So, the problem of landscape degradation and ecosystems fragmentation is one of the greatest threats for biodiversity. Thus, European Commission has decided that it is necessary to restore at least 15 per cent of degraded ecosystems before year 2020.

The problem shown above can be addressed on different scales, but it is also necessary to study the restoration on small scale, under the action 6b of EU Biodiversity Strategy to 2020. This research work has focused on implementing environmental criteria in decision making during roadway project assessment to restore large cut slopes generated by existing infrastructures.

This paper presents an expert system, combining the Analytical Hierarchy Process (AHP) with the Delphi method and the VIKOR technique, capable of dealing with environmental criteria together with traditional technical and economical criteria. Taking this methods, it will be shown the importance of security and environmental factors, usually infraconsidered, and as well the major suitability of one of the technologies of restoration, cut and cover tunnels, on the other proposed alternatives.



## **INDICE GENERAL**

<b>Resumen, Resum, Summary .....</b>	<b>3</b>
<b>CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>19</b>
<b>CAPÍTULO 2 TÉCNICAS DE RESTAURACIÓN .....</b>	<b>33</b>
2.1 Alteraciones sobre el medio ambiente generadas por grandes desmontes .....	36
2.2 Medidas correctoras empleadas.....	48
<b>CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA.....</b>	<b>77</b>
3.1 Método Delphi. ....	80
3.2 Método AHP.....	84
3.3 Método VIKOR .....	96
<b>CAPÍTULO 4 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA</b>	<b>101</b>
4.1 Delphi. Formación de la estructura jerárquica.....	103
4.2 Resultados del AHP .....	114
4.3 Aplicación del método VIKOR.....	133
<b>CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES.....</b>	<b>141</b>
<b>CAPÍTULO 6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>149</b>
<b>CAPÍTULO 7 ANEXO.....</b>	<b>163</b>

## **LISTADO DE FIGURAS**

Figura 1. Componentes de la Infraestructura Verde (EUCOM, 2013)

Figura 2. Fragmentación territorial (2009) y Red Natura 2000 (EEA/FOEN, 2011)

Figura 3. Grandes desmontes en AP-7, Les Valls, Valencia (carril derecho, sentido Norte)

Figura 4. Impactos ambientales derivados de la existencia de una infraestructura lineal (EEA/FOEN, 2011)

Figura 5. Desmante afectado por fuerte erosión superficial en vial urbano, Paterna (Valencia)

Figura 6. Fragmentación territorial en la Unión Europea, por países, para el año 2009 (EEA/FOEN, 2011)

Figura 7. Vista de muro de contención de escollera en vial urbano

Figura 8. Geometría de un muro de contención de escollera de carretera (MFO, 2006)

Figura 9. Muro de escollera en desmante de carretera (MFO, 2006)

Figura 10. Muro de mampostería

Figura 11. Estaquillado (NTJ 12S, 2013)

Figura 12. Peldaños de leña (NTJ 12S, 2013)

Figura 13. Trenzados de leña (NTJ 12S, 2013)

Figura 14. Mantas orgánicas

Figura 15. Geoestera en talud de carretera, Paterna (Valencia)

Figura 16. Efecto de la existencia de un túnel en la densidad de red efectiva (EEA/FOEN, 2011)

Figura 17. Probabilidad de persistencia de especies en función de la densidad efectiva de malla (elaboración propia a partir de van der Reer et al, 2015)

Figura 18. Diagrama de la consulta Delphi

Figura 19. Ejemplo de Estructura de Jerarquía

Figure 20. Estructura de Jerarquía para el problema de restauración de grandes desmontes de carretera

Figura 21. Pesos de los factores que intervienen en la selección de alternativas

Figura 22. Representación de las prioridades globales para las estrategias derivadas de AHP

Figura 23. Pesos de los factores que intervienen en la selección de alternativas

Figura 24. Priorización de las alternativas (salida de resultados VIKOR)

## **LISTADO DE TABLAS**

Tabla 1. Escala de T. Saaty (Saaty, 2012)

Tabla 2. Escala de Saaty de acuerdo con Vargas (Vargas, 2010).

Tabla 3. Valor máximo de CR admisible (Saaty, 2012)

Tabla 4. Índice de consistencia aleatorio (RCI).

Tabla 5. Cuestionario para la evaluación de los principales criterios.

Tabla 6. Plantilla para la evaluación de los sub-factores

Tabla 7. Valoración obtenida por los pares de factores comparados, para cada experto consultado

Tabla 8. Valoración obtenida por los pares de sub-factores comparados, para cada experto consultado

Tabla 9. Vector de prioridades y análisis de consistencia de la matriz de c.p.p de los factores

Tabla 10a. Vector de prioridades para la matriz de comparación de sub-factores del FACTOR MEDIO PERCEPTUAL

Tabla 10b. Vector de prioridades para la matriz de comparación de sub-factores del FACTOR MEDIO FÍSICO

Tabla 10c. Vector de prioridades para la matriz de comparación de sub-factores del FACTOR FUNCIONAL

Tabla 10d. Vector de prioridades para la matriz de comparación de sub-factores del FACTOR TERRITORIAL.

Tabla 10e. Vector de prioridades para la matriz de comparación de sub-factores del FACTOR ECONÓMICO

Tabla 11. Valores globales obtenidos para los factores y sub-factores

Tabla 12. Agregación de los juicios comparativos entre estrategias de restauración para el sub-criterio impacto paisajístico (LA)

Tabla 13. Agregación de los juicios comparativos entre estrategias de restauración para el sub-criterio impacto visual (VI)

Tabla 14. Agregación de los juicios comparativos entre estrategias de restauración para el sub-criterio medio abiótico (AB)

Tabla 15. Agregación de los juicios comparativos entre estrategias de restauración para el sub-criterio medio biótico (BI)

Tabla 16. Agregación de los juicios comparativos entre estrategias de restauración para el sub-criterio seguridad vial (SA)

Tabla 17. Agregación de los juicios comparativos entre estrategias de restauración para el sub-criterio afección a usuarios durante la ejecución (US)

Tabla 18. Agregación de los juicios comparativos entre estrategias de restauración para el sub-criterio coordinación con el planeamiento territorial (TE)

Tabla 19. Agregación de los juicios comparativos entre estrategias de restauración para el sub-criterio ocupación en planta (HO)

Tabla 20. Agregación de los juicios comparativos entre estrategias de restauración para el sub-criterio fragmentación de hábitats (FR)

Tabla 21. Agregación de los juicios comparativos entre estrategias de restauración para el sub-criterio coste de inversión (CO)

Tabla 22. Agregación de los juicios comparativos entre estrategias de restauración para el sub-criterio coste de explotación (OM)

Tabla 23. Acrónimos empleados para denotar a los distintos factores y sub-factores propuestos.

Tabla 24. Acrónimos empleados para denotar las distintas estrategias de restauración propuestas.

Tabla 25a. Vector de prioridades y análisis de consistencia para la matriz de comparación por pares para las seis estrategias de restauración, con respecto al sub-factor impacto paisajístico (LA)

Tabla 25b. Vector de prioridades y análisis de consistencia para la matriz de comparación por pares para las seis estrategias de restauración, con respecto al sub-factor impacto visual (VI)

Tabla 25c. Vector de prioridades y análisis de consistencia para la matriz de comparación por pares para las seis estrategias de restauración, con respecto al sub-factor medio abiótico (AB)

Tabla 25d. Vector de prioridades y análisis de consistencia para la matriz de comparación por pares para las seis estrategias de restauración, con respecto al sub-factor medio biótico (BI)

Tabla 25e. Vector de prioridades y análisis de consistencia para la matriz de comparación por pares para las seis estrategias de restauración, con respecto al sub-factor seguridad vial (SA)

Tabla 25f. Vector de prioridades y análisis de consistencia para la matriz de comparación por pares para las seis estrategias de restauración, con respecto al sub-factor afección a usuarios durante la ejecución (US)

Tabla 25g. Vector de prioridades y análisis de consistencia para la matriz de comparación por pares para las seis estrategias de restauración, con respecto al sub-factor coordinación con el planeamiento territorial (TE)

Tabla 25h. Vector de prioridades y análisis de consistencia para la matriz de comparación por pares para las seis estrategias de restauración, con respecto al sub-factor ocupación en planta (HO)

Tabla 25i. Vector de prioridades y análisis de consistencia para la matriz de comparación por pares para las seis estrategias de restauración, con respecto al sub-factor fragmentación de hábitats (FR)

Tabla 25j. Vector de prioridades y análisis de consistencia para la matriz de comparación por pares para las seis estrategias de restauración, con respecto al sub-factor coste de inversión (CO)

Tabla 25k. Vector de prioridades y análisis de consistencia para la matriz de comparación por pares para las seis estrategias de restauración, con respecto al sub-factor coste de explotación (OM)

Tabla 26. Matriz de decisión para las estrategias consideradas

Tabla 27. Prioridades globales para las estrategias derivadas de AHP

Tabla 28. Matriz de decisión transpuesta

Tabla 29. Estimación de los valores  $S_j$ ,  $R_j$  y  $Q_j$  del método VIKOR

Tabla 30. Priorización de estrategias a partir de  $S$ ,  $R$  y  $Q$  (VIKOR)

## **LISTADO DE ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS**

AB: Medio Abiótico

AHP: Analytical Hierarchy Process

AIJ: Agregación de juicios individuales

BI: Medio Biótico

CI: Índice de consistencia

CO: Coste de construcción

CR: Ratio de consistencia

CUT: Falso túnel

ECO: Económico

EEA: Agencia Europea del Medio Ambiente

EUCOM: Comisión Europea

FR: Fragmentación de Hábitats

FUN: Funcional

GVA: Generalitat Valenciana

HDPE: Polietileno de alta densidad

HO: Ocupación en planta

IENE: Infra Eco Network Europe

IV: Infraestructura Verde

LA: Impacto sobre el paisaje

MCDM: Métodos de Decisión Multi-criterio

MFO: Ministerio de Fomento del Gobierno de España

MMA: Ministerio de Medio Ambiente del Gobierno de España

OM: Mantenimiento

PEE: Medio Perceptual

PHE: Medio Físico

RCI: Índice de consistencia aleatorio

ROO: Afloramientos en taludes

SA: Seguridad vial

SBI: Medidas de bio-ingeniería

TE: Coordinación con el Planeamiento Urbanísticos y Territorial

TEC: Territorial

TER: Aterrazamiento

UE: Unión Europea

UN: Naciones Unidas

US: Afección a usuarios durante la construcción

VI: Impacto visual

VIKOR: Optimización Multicriterio y Solución de Compromiso

WOV: Pasos superiores aptos para fauna

WUN: Pasos inferiores aptos para fauna

# **CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN**



La diversidad biológica es nuestro capital natural, siendo el soporte fundamental que sostiene nuestra economía. Esto hace de la degradación de nuestra diversidad biológica una de las amenazas ambientales más críticas, si no la mayor. 'Our life insurance, our natural capital: an European Union biodiversity strategy to 2020' (EUPAR, 2012) es un importante documento del Parlamento Europeo el cual persigue definir la estrategia a seguir, por parte de la Unión Europea, para la defensa de la diversidad biológica de nuestro territorio, y que abarca un periodo de una década el cual, por tanto, alcanza hasta 2020. Es decir, actualmente nos hallamos plenamente inmersos en el desarrollo de tal estrategia. La misma persigue revertir la pérdida de diversidad biológica y favorecer una rápida transición, en la Unión Europea, hacia una economía sostenible y verde. Sin embargo, siguen estando presentes las crecientes presiones sobre la diversidad biológica de Europa: el cambio en los usos del suelo, la sobreexplotación de la diversidad biológica y sus componentes, las infraestructuras de transporte, la extensión de especies invasivas de naturaleza alóctona y la contaminación, entre otros. Además, otros factores indirectos (Curiel-Esparza y Canto-Perelló, 2012), como el aumento de población, la conciencia limitada y parcial sobre la importancia de la diversidad biológica y el hecho de que los criterios ambientales no son suficientemente considerados en los procesos de toma de decisiones, también suponen un importante peaje para aquélla, esto es, para la biodiversidad.

En línea con lo anterior, el problema de la degradación del paisaje (en su acepción más amplia) y la fragmentación de ecosistemas es una de las mayores amenazas para la diversidad biológica (UN, 1992). En tal sentido, no puede obviarse el importante impacto que tienen las infraestructuras de transporte terrestre, como carreteras, ferrocarriles y otras, las cuales generan sobre el paisaje y, por lo tanto, sobre todos los elementos que lo componen, perturbaciones que, en muchas ocasiones, presentan un grado de criticidad alto. Consecuentemente, se hace necesario el establecimiento de las medidas preventivas o correctoras necesarias (dependiendo de la fase de decisión en que se encuentre una actuación determinada) para la protección del referido paisaje (EUCON, 2000) y, en general, del medio ambiente afectado. En cuanto a esto, el Parlamento Europeo ha decidido que es necesario restaurar al menos el 15 por ciento de ecosistemas degradados antes de 2020 (EUPAR, 2012). Así pues, esto

obliga a los estados miembros de la Unión Europea a restaurar hábitats alterados a razón de la importante trama de vías de transporte existente en el conjunto de Europa, todo ello a fin de lograr los objetivos establecidos para el año 2020.

Es importante señalar ahora que el problema al que nos venimos refiriendo, es decir, restaurar un porcentaje significativo de hábitats degradados, puede ser acometido a diferentes escalas, esto es, a escala regional o a escala local. La presente tesis pretende ocuparse de tal problema pero desde el punto de vista, ya comentado, del daño derivado por las vías de comunicación terrestre. Es ahí donde se ha enfocado el análisis seguido puesto que, como también se ha comentado, son una importante fuente de alteración medioambiental.

Con todo, a gran escala, problemáticas como la fragmentación de hábitats y la degradación del paisaje por infraestructuras de transporte, han sido estudiadas desde puntos de vista diferentes por muchos autores. Así, se ha tratado el problema estudiándolo de forma directa, sobre las carreteras (Forman y Sperling, 2011) o indirecta, a través de la generación de pasillos verdes que mantengan la conectividad ecológica del medio (Shapira et al, 2013). Pero, se hace también necesario estudiar la restauración de los ecosistemas degradados a pequeña escala. En tal caso, y de acuerdo con la acción 6b de Estrategia de Diversidad biológica de la Unión Europea hasta 2020, se tiene la necesidad de generar una Infraestructura Verde Europea (en adelante nos podremos referir a la misma como IV). Esta Infraestructura Verde estará compuesta, de acuerdo con lo así previsto por la Comisión Europea (EUCOM, 2013) por elementos como los que se señalan seguidamente:

- *Zonas protegidas, como los sitios de Natura 2000.*
- *Ecosistemas sanos y zonas de alto valor ecológico fuera de las zonas protegidas, como llanuras aluviales, humedales, litorales, bosques naturales, etc...*

- *Elementos paisajísticos naturales, como pequeños cursos de agua, manchas de bosque, setos que pueden actuar como pasillos verdes o piedras pasaderas para la fauna silvestre.*
- *Manchas de hábitats regenerados creadas pensando en especies concretas, por ejemplo, para aumentar la extensión de una zona protegida o de los lugares de alimentación, cría o descanso para esas especies y favorecer su migración o dispersión.*
- *Elementos artificiales, como ecoductos o puentes verdes diseñados para favorecer la movilidad de las especies a través de barreras paisajísticas insalvables.*



Figura 1. Componentes de la Infraestructura Verde (EUCOM, 2013)

- *Zonas multifuncionales en las que se promuevan usos del suelo que ayuden a mantener o regenerar unos ecosistemas biodiversos y sanos frente a otras actividades incompatibles.*

- *Zonas en las que se apliquen medidas para mejorar la calidad ecológica general y la permeabilidad del paisaje.*
- *Elementos urbanos como parques verdes, muros verdes y tejados verdes que alberguen biodiversidad y permitan a los ecosistemas funcionar y prestar sus servicios mediante la conexión de zonas urbanas, periurbanas y rurales.*
- *Elementos para la adaptación y la mitigación del cambio climático, como marismas, bosques de llanuras aluviales y pantanos (para la prevención de inundaciones, el almacenamiento de agua y la absorción de CO<sub>2</sub>), que den margen a las especies para reaccionar ante los efectos del cambio climático.*

De todos los elementos que componen la importante y pretendida Infraestructura Verde Europea, queremos fijarnos en la referencia que se hace a que, como tales elementos, están considerados los ecoductos y puentes verdes diseñados para favorecer la movilidad de las especies a través de barreras paisajísticas insalvables. Su consideración como tales componentes de la IV les dotan de una relevancia especial y, puesto que juegan un papel muy importante, en tanto que son alternativas en el proceso de diseño de restauración de grandes desmontes en carreteras existentes, supone un importante punto de apoyo al análisis que en el mismo se desarrolla.

Asimismo, respecto a la Red Natura 2000, elemento clave en la configuración de la Infraestructura Verde, ha de decirse que gracias a ésta, ya sea por el tipo de especies que albergan, o bien por los hábitats que los componen, hoy en día ya están bajo protección gran parte de las áreas de Europa que presentan valores ambientales reseñables. Ha de destacarse que la Red Natura 2000 comprende 26.000 sitios y cubre aproximadamente el 18% del territorio de la UE (EUCOM, 2013).

Sin embargo, la actual Red Natura 2000 es un sistema de áreas protegidas altamente fragmentado, que representa, en definitiva, un conjunto inconexo de islas de alto valor ecológico (ver figura 02). Es por ello que es necesario que tal

sistema quede integrado de forma efectiva en la Infraestructura Verde, a fin de dotarlo de la necesaria conectividad para que, realmente, cubra la importante función ecológica que se espera del mismo (EEA/FOEN, 2011).

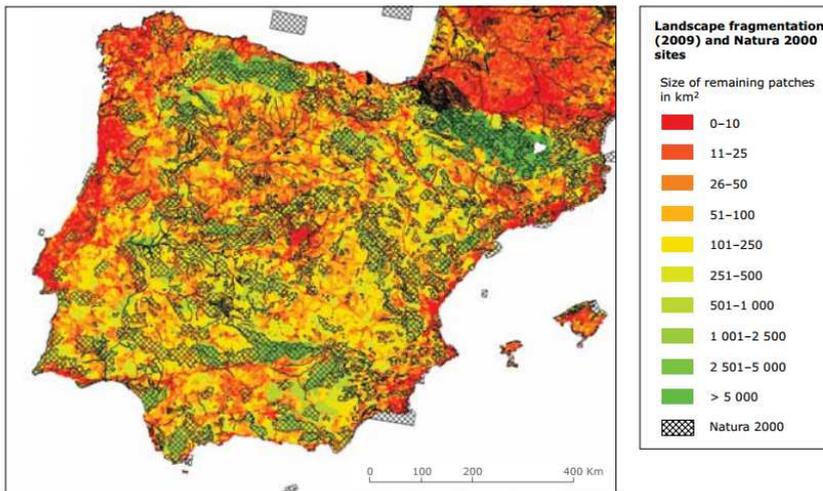


Figura 2. Fragmentación territorial (2009) y Red Natura 2000 (EEA/FOEN, 2011)

El aumento de conectividad necesario al que se hace referencia pasa, en muchos casos, por la ejecución de elementos concretos y de acción muy localizada, como es el caso de los ecoductos nombrados, pero también otros muchos de similar función, a fin de conectar de nuevo esas áreas naturales artificialmente divididas por la red de infraestructuras lineales (IENE - Infra Eco Network Europe Steering Committee, 2013).

Volviendo a la escala de trabajo, una de las cuestiones que, entonces, se plantea cuando se trabaja a pequeña escala es cómo actuar. Es decir, si bien es cierto que a escalas grandes la sistemática planificadora guía al propio proceso de toma de decisiones, a menor escala encontramos habitualmente una falta de consenso en la determinación y manejo de criterios de elección que, quedando muy abiertos, se fundamentan, demasiadas veces, en reglas de buena práctica o, en el mayor de los casos, en la prevalencia de un enfoque economicista en torno al cual se gestiona la búsqueda de las soluciones técnicas a implementar. Es así que, concretamente para el caso de la restauración de ecosistemas

degradados por vías de comunicación terrestre, se plantea la problemática de cómo afrontar tal restauración desde el proyecto hasta la ejecución de la solución elegida.

Así pues, la presente tesis se ha fijado en la definición y evaluación del peso que ha de darse a los distintos criterios, que aquí llamaremos factores, los cuales entran en juego en los procesos de toma de decisión relativos a actuaciones en materia de infraestructuras de transporte terrestre tales como carreteras, ferrocarriles, etc. Concretamente, nos han preocupado aquellos factores que condicionan la selección de alternativas en actuaciones encaminadas a la restauración de grandes desmontes en carreteras ya existentes. En tales casos, cuando se da una interferencia entre una carretera y un terreno ondulado, los criterios técnicos y/o económicos son los que habitualmente definen tal interferencia (Marjanovic et al, 2011; Han et al, 2008). Si la elección de la forma de solventar tal problema es adecuada, y se hace en base a un conjunto mucho más amplio de criterios que, asimismo, engloba a los citados, podrá evitarse o minimizarse un impacto severo o crítico sobre el medio ambiente.

Si no es así, se genera una alteración del medio que lleva a la degradación de los ecosistemas afectados, a una menguante biodiversidad y, en última instancia, a la necesidad de implementación de políticas como la que la UE ha dispuesto en su estrategia para la restauración de tales ambientes degradados. Es así que, como se viene diciendo y emanando directamente de tales políticas, se hace necesaria la restauración de hábitats dañados, restauración que se apoya indefectiblemente en soluciones técnicas sostenidas, a su vez, en criterios o factores que las harán más o menos idóneas. Es así que volvemos a encontrar que, también para el caso de las actuaciones de restauración de grandes desmontes de carretera, entran en juego una serie de criterios entre los que se corre el riesgo de valorar exageradamente, bien por excesiva simplificación, por sesgo u otros motivos, un subconjunto concreto de aquellos y que, muy probablemente, vuelvan a ser factores como los técnicos o económicos.

Dicho de otro modo, se corre el riesgo de que los criterios que favorecieron el desarrollo de soluciones técnicas que generaron un problema de degradación de ecosistemas en Europa, en tanto permitieron la creación de una red de

carreteras con poca sensibilidad ambiental, vuelvan a ser los preponderantes para los técnicos que deban, por mandato del Parlamento Europeo y en ánimo a corregir los impactos derivados de aquellas decisiones, seleccionar las mejores alternativas de restauración, lo que puede tener el agravante que se deriva de las sinergias que se dan ante combinaciones de unos y otros criterios (Canto-Perelló et al, 2009).

Ha de decirse, asimismo, que el objeto de la presente tesis se refiere a un caso abierto pero, por eso mismo, concreto. Es decir, el planteamiento que se persigue es el de ponderar los criterios que sirven de base a los procesos de selección de alternativas de restauración de desmontes en todos aquellos casos en los que no se da un condicionante que prima, de forma significativa, sobre los restantes. Si se plantea una ocasión en la que la estabilidad geológica, la altura de los taludes o incluso la verticalidad de los mismos imposibilita una u otra alternativa de restauración, decantando casi de forma inmediata la solución buscada en un sentido u otro, se presume que no será necesario el manejo de los factores que participan en la decisión y que ahora, en el presente documento, han sido objeto de análisis.

El alcance de esta tesis es el propio de la ingeniería de detalle, en tanto pretende estudiar el ámbito de la restauración como actuación concreta y de carácter muy local, es decir, se trata de un enfoque a pequeña escala. Es así que, previamente al mismo, habrá habido, como es propio del proceso planificador o decisorio, un tratamiento del problema que habrá aconsejado proceder a restaurar unos desmontes u otros en función de criterios de carácter regional, esto es, a gran escala. En tal caso se habrá podido atender, entre otros, al estudio de las pautas de comportamiento de las especies que pueblen el área, de forma que se conozca cuáles serán aquellos desmontes cuya restauración tenga más posibilidades de éxito, desde el punto de vista de la fragmentación de ecosistemas y de la permeabilidad territorial. Esta importante afección se hace muy visible en la figura 3, la cual muestra la importante fractura provocada por una vía de gran capacidad en el territorio. En función de qué criterios definir su restauración, de ser el caso, y en base a qué opciones o soluciones determinar las posibles alternativas de restauración, es un trabajo

complejo para el que no existe un patrón a seguir o una guía en la que apoyarse.

De todas tales consideraciones, y una vez decididas en etapas superiores de la planificación qué áreas habrá que restaurar, es cuando se planteará cómo proceder a tal restauración siendo, entonces sí, muy interesante poder conocer la forma de ponderar los factores que condicionan la decisión, así como la preferencia general por las alternativas (en nuestro caso estrategias de restauración) que podrán ser más indicadas. Para la problemática propia y objeto de la presente tesis, relativa a la selección de alternativas, en situaciones abiertas, de restauración de grandes desmontes de carretera, se han considerado criterios ambientales, funcionales, territoriales y económicos (GVA, 2014). Todos ellos, con sus pesos diferentes, se han analizado en relación con las alternativas de restauración a ejecutar posibles.



Figura 3. Grandes desmontes rocosos en la vía de gran capacidad AP-7, Les Valls, Valencia (carril derecho, sentido Norte)

Los criterios aludidos son los que se prescriben para la Fase B que se da durante la realización de Estudios Informativos de carreteras (MFO, 2009), y en la que se encaja el análisis multi-criterio de las alternativas en liza. De ahí que estos

mismos se hayan tomado como referencia a la hora de configurar la batería de criterios que determinan la selección de alternativas en el caso objeto de la presente tesis. Suelen referirse a las siguientes variables:

- Ambiental: este criterio conlleva la búsqueda de la alternativa que menos impactos suponga sobre el medio ambiente. Está constituido por todas las componentes que forma el Medio Ambiente, y que pueden desagregarse como siguen:
  - o Medio Físico:
    - Biótico
    - Abiótico.
  - o Medio Perceptual.
  - o Medio Humano o Socio-económico.
  
- Funcional: se busca que este criterio potencie la alternativa que mejor servicio preste al usuario. Las variables que suelen considerarse para el mismo, en el caso de carreteras, son las que se indican seguidamente:
  - o Velocidad de proyecto
  - o Calidad de trazado
  - o Seguridad vial
  - o Facilidad de programación
  - o Afección al usuarios durante la fase de construcción

- Territorial: este criterio fomenta las alternativas que supongan una mejor inserción en el territorio en el que se lleva a cabo la actuación. El mismo se descompone en las siguientes variables:
  - o Conectividad
  - o Permeabilidad territorial
  - o Coordinación con otros planeamientos
- Económico: este criterio marca el objetivo de búsqueda de la alternativa más rentable, término que considera tanto la inversión inicial como los costes de explotación.

Al igual que nos hemos referido a los criterios como factores, por ser antes bien los componentes del medio global en que se inserta la actuación, a las alternativas se las ha denominado estrategias de restauración, en tanto, como se verá más adelante, cada una de tales estrategias engloba un conjunto de varias soluciones técnicas dirigidas a la mitigación de distintos impactos.

Una vez definidos los factores y las estrategias de restauración a analizar, la presente tesis ha propuesto un sistema experto que permita la interacción adecuadamente ponderada de criterios de naturaleza medioambiental o territorial con otros de corte más funcional o económico. Para ello, el referido sistema propuesto se basa en una combinación del método AHP (Analytical Hierarchy Process), desarrollado inicialmente por el matemático T. Saaty, con el método Delphi y el método VIKOR, también empleados por otros autores (Martín-Utrillas et al, 2015a). Ha de decirse que los sistemas expertos han sido usados extensamente en el análisis de cuestiones diferentes, tales como urbanas, ambientales y similares (Curiel-Esparza y Canto-Perelló, 2013; Dong et al, 2013; Hayati et al, 2013; Herranz-Pascual et al, 2013; Naddeo et al, 2013; Wang et al, 2013; Girald y Torre, 2012; Park et al, 2011; Sadeghi-Niaraki et al, 2010).

La técnica Delphi, ampliamente conocida y empleada en problemas de decisión, y que asimismo se basa en el uso de cuestionarios cumplimentados por un panel de expertos según una serie de fases implementadas, se ha usado en este trabajo como primera y necesaria etapa para obtener la información de partida sobre la que, posteriormente, se han aplicado métodos multicriterio con fines distintos.

Respecto a la metodología AHP (Analytical Hierarchy Process), ha de indicarse que ésta permite el uso de variables lingüísticas, lo que la hace muy adecuada para asuntos de naturaleza difícilmente cuantificable, como temáticas medioambientales, sociales, etc, en las cuales existen factores intangibles de difícil tratamiento que, sin embargo, no pueden despreciarse (Curiel-Esparza y Canto-Perelló, 2013; Kukut et al, 2014).

Se trata, así pues, de una metodología que se basa en la comparación, dos a dos, de juicios emitidos por expertos en la materia tratada (Canto-Perelló et al, 2013). Cómo medir intangibles es la principal tarea desarrollada por el armazón matemático del método. La experiencia de muchos años de uso de esta metodología en numerosos campos, muestra que es adecuada para discernir qué información es más relevante en problemas complejos de selección multicriterio. Shapira et al (2013), por ejemplo, han empleado este método para estudiar importantes elementos de la Red de Infraestructura Verde, tales como corredores verdes, así como el análisis de los criterios que determinan su localización en el territorio.

Por último, el método VIKOR (Aghdaie et al, 2014) tiene por objeto, en problemas de decisión en los que existe conflicto entre criterios no mensurables, encontrar una solución de compromiso que, estando en el grupo de las más deseadas por los expertos, es a su vez la que menos desagrada despierta entre los mismos. Es, pues, un método altamente interesante y muy adecuado para una problemática como la que se trata en el presente documento, esto es, para determinar cuál puede ser la estrategia de restauración de grandes desmontes de mayor consenso, en el caso trabajado aquí.

Vista la necesidad, reconocida por los más altos estamentos administrativos de la Unión Europea, de proceder a la restauración de ecosistemas degradados, y visto que la red de infraestructuras viarias es una importante fuente perturbadora de los mismos, los objetivos fundamentales del presente trabajo son los siguientes:

1. realizar una contribución a la mejor determinación de los pesos de los criterios que, de forma habitual, se manejan en los problemas de decisión relacionados con la restauración de grandes desmontes de carreteras existentes.
  
2. determinar, de forma rigurosa y mediante el empleo de herramientas matemáticas de demostrada solvencia en el ámbito de los problemas de decisión multi-criterio, la alternativa de restauración preferida en base a una selección de consenso.

## **CAPÍTULO 2 TÉCNICAS DE RESTAURACIÓN**



La restauración de ecosistemas dañados es una prioridad para las más altas instituciones europeas. La presente tesis se ha marcado como objetivo el aportar elementos que ayuden a la mejor ponderación de los criterios que participan en la selección de alternativas de restauración de grandes desmontes en carreteras existentes, así como a la jerarquización de estas mismas alternativas.

Si atendemos a los objetivos generales de una Infraestructura Verde Europea, los cuales son, de un lado, mantener la biodiversidad en Europa garantizando la coherencia ecológica y la conectividad de la red Natura 2000 (conforme al artículo 10 de la Directiva Hábitats) y, de otro, proteger y regenerar los ecosistemas naturales valiosos (EUCOM, 2013), vemos que la restauración de los grandes desmontes, que es objeto del presente trabajo, queda perfectamente encajada en la generación de la referida Infraestructura Verde, dado que supone:

- generar nuevos hábitats que, en mayor o menor medida, sirvan a las especies locales del ámbito restaurado, siempre en pro de alcanzar el mayor objetivo de evitar la pérdida de biodiversidad.
- Pretende aumentar la conectividad entre áreas de valor ecológico reseñable, mediante la creación de una red de pasillos verdes que permita la interrelación de individuos de todas ellas, evitando el empobrecimiento genético de las poblaciones de flora (Picó y Quintana-Ascencio, 2005) y fauna (Tellería et al, 2011) y, por tanto, su desaparición final.

En línea con todo ello, el presente capítulo aborda las técnicas y soluciones actualmente existentes todas las cuales se emplean en la restauración de desmontes generados por carreteras. Con ello se pretende aportar una base suficiente para explicar la génesis de a las que son las alternativas de restauración que más tarde se proponen y priorizan. En este sentido, ha de decirse que el presente trabajo se ha apoyado en las técnicas y soluciones que ahora se expondrán para generar un set de seis alternativas globales que, por el hecho de estar constituidas por conjuntos de las soluciones a las que ahora nos

estamos refiriendo, se han dado en llamar como estrategias de restauración. Es así que la elección del término *estrategia* no es gratuita, puesto que lo que se exponen y evalúan más adelante, en calidad de alternativas, son seis grupos de soluciones, cada uno de los cuales contempla la combinación de varias opciones o medidas de corrección de distintos impactos derivados de la existencia de los desmontes.

En primer lugar, y por lo dicho, se entrará, a continuación, a exponer los impactos generados por los desmontes en obras lineales de vías de comunicación, poniendo el acento en el caso concreto que nos ocupa, esto es, el de las carreteras.

Posteriormente, ya sí, se procederá a describir las soluciones actualmente disponibles para la corrección de los impactos descritos en el caso que es objeto del presente trabajo, indistintamente para taludes de tierra o rocosos.

## **2.1 Alteraciones sobre el medio ambiente generadas por grandes desmontes**

Son muchas las publicaciones que recogen las perturbaciones que se derivan de la ejecución y existencia de las infraestructuras viarias y, de forma más amplia, de las obras lineales de ingeniería civil. Es, asimismo, ya larga la experiencia en la evaluación del impacto ambiental de este tipo de actuaciones, viniendo de muy lejos el proceso de la referida evaluación, y habiendo evolucionado mucho el mismo a lo largo de tan amplio periodo. Puesto que no es objeto de este trabajo el tratar sobre la apasionante y rica temática del impacto ambiental en carreteras, no cabe detenerse mucho en ello. No obstante, es necesario realizar un par de consideraciones al respecto:

- Cuando se habla de impactos generados por una obra lineal de ingeniería civil, como es el caso de una carretera, hay que distinguir entre los que se producen durante la ejecución de la obra y los que se dan en la fase de servicio. Esto es esencial en tanto que los impactos que tienen lugar durante la etapa en la que se lleva a cabo la construcción de la vía, serán aquéllos fruto de acciones propias de la obra, mientras que

cuando la carretera ya esté en servicio, los impactos sobre el medio ambiente serán los que se deriven tanto de la presencia en sí de la misma, como de la función que desarrolla, esto es, el transporte rodado.

Es así que, en el caso que nos ocupa en el presente trabajo, y puesto que la carretera ya existe, nos preocupan los impactos ambientales que se generan como consecuencia de la existencia en sí de los desmontes practicados.

- Por otra parte, es necesario referirse a que, dependiendo de la etapa proyectual en que se halle una actuación, es posible aplicar tres tipos diferentes de medidas mitigadoras del impacto, como son las preventivas, correctoras y compensatorias.

Las preventivas sólo es posible aplicarlas durante la fase de diseño de la actuación, y preferentemente en etapas tempranas, esto es, en Estudios Informativos o proyectos básicos (anteproyectos). Consisten en la evitación o mitigación de un impacto a razón de un cambio en el diseño de la actuación. De esta forma, si se pretende anular un posible impacto, o paliarlo de partida, sólo con cambios en el diseño de la actuación (trazado en planta, trazado en alzado, sección, etc.) será esto posible. Este tipo de medidas no resultan interesantes en el trabajo presente, dado que la carretera ya existe y el desmonte ya se halla ejecutado, con lo que no es posible, por ejemplo, variar el trazado para minimizar sus dimensiones, o similar.

Las correctoras son las medidas propias de la etapa de ingeniería de detalle, esto es, de proyectos de trazado, constructivos, etc., si bien muchas veces se definen ya en la etapa anterior, puesto que los Estudios de Impacto Ambiental son propios de la fase de los Estudios de Soluciones, que va, asimismo, asociada a la redacción de Estudios Informativos, proyectos básicos, etc.

Se trata generalmente de medidas de final de tubería. Una vez se ha seleccionado la alternativa a desarrollar, la cual presumiblemente

minimiza la generación de impactos ambientales frente a las demás en liza, se generarán una serie de impactos imposibles de eliminar en origen, pero sí de tratar de forma que resulten minimizados o incluso, si es posible, eliminados. Es en ese caso en el que las medidas a emplear son de naturaleza correctora. Por ser tales, son las que interesan para el caso presente, puesto que los desmontes, ya existentes, requerirán para su restauración e integración paisajística de actuaciones paliativas concretas, de forma que cada uno de los diferentes impactos provocados por la presencia del desmonte, puedan así verse corregidos parcial o totalmente.

Finalmente se tiene el grupo conocido como de medidas compensatorias. Estas son un grupo de tales medidas las cuales, una vez el proyecto está definitivamente definido, y vista la generación de algún o algunos impactos críticos (aquellos que, ni si quiera con la aplicación de medidas correctoras, quedan mitigados), se proponen al objeto de compensar la pérdida irreparable de un valor ambiental determinado. Se trata pues de un grupo de medidas que, si bien podrá interesar en casos puntuales de restauración de grandes desmontes en carreteras, no caben ser consideradas en el presente trabajo, puesto que, como se ha comentado en anteriores ocasiones, nos interesa situarnos en el caso general.

Con todo, se aporta, en la figura 4, una relación de los impactos ambientales que se derivan de una actuación en materia de carreteras. Como se observará, se han agrupado por temas, si bien tales temas se refieren a las distintas componentes que conforman el medio ambiente.

<b>Theme</b>	<b>Consequences of linear infrastructure facilities</b>
<b>Land cover</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Land occupation for road surface and shoulders</li> <li>• Soil compaction, sealing of soil surface</li> <li>• Alterations to geomorphology (e.g. cuts, embankments, dams, stabilisation of slopes)</li> <li>• Removal of vegetation, alteration of vegetation</li> </ul>
<b>Local climate</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modification of temperature conditions (e.g. heating up of roads, increased variability in temperature)</li> <li>• Accumulation of cold air at embankments of roads (cold-air build-ups)</li> <li>• Modification of humidity conditions (e.g. lower moisture content in the air due to higher solar radiation, stagnant moisture on road shoulders due to soil compaction)</li> <li>• Modification of light conditions</li> <li>• Modification of wind conditions (e.g. due to aisles in forests)</li> <li>• Climatic thresholds</li> </ul>
<b>Emissions</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vehicle exhaust, pollutants, fertilising substances leading to eutrophication</li> <li>• Dust, particles (abrasion from tyres and brake linings)</li> <li>• Oil, fuel, etc. (e.g. in case of traffic accidents)</li> <li>• Road salt</li> <li>• Noise</li> <li>• Visual stimuli, lighting</li> </ul>
<b>Water</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Drainage, faster removal of water</li> <li>• Modification of surface water courses</li> <li>• Lifting or lowering of groundwater table</li> <li>• Water pollution</li> </ul>
<b>Flora and fauna</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Death of animals caused by road mortality (partially due to attraction of animals by roads or railways: 'trap effect')</li> <li>• Higher levels of disturbance and stress, loss of refuges</li> <li>• Reduction or loss of habitat; sometimes creation of new habitat</li> <li>• Modifications of food availability and diet composition (e.g. reduced food availability for bats due to cold air build-ups along road embankments at night)</li> <li>• Barrier effect, filter effect to animal movement (reduced connectivity)</li> <li>• Disruption of seasonal migration pathways, impediment of dispersal, restriction of recolonisation</li> <li>• Subdivision and isolation of habitats and resources, breaking up of populations</li> <li>• Disruption of metapopulation dynamics, genetic isolation, inbreeding effects and increased genetic drift, interruption of the processes of evolutionary development</li> <li>• Reduction of habitat below required minimal areas, loss of species, reduction of biodiversity</li> <li>• Increased intrusion and distribution of invasive species, pathways facilitating infection with diseases</li> <li>• Reduced effectiveness of natural predators of pests in agriculture and forestry (i.e. biological control of pest more difficult)</li> </ul>
<b>Landscape scenery</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Visual stimuli, noise</li> <li>• Increasing penetration of the landscape by roads, posts and wires</li> <li>• Visual breaks, contrasts between nature and technology; occasionally vivification of landscapes (e.g. by avenues with trees)</li> <li>• Change of landscape character and identity</li> </ul>
<b>Land use</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Consequences of increased accessibility for humans due to roads, increase in traffic volumes, increased pressure for urban development and mobility</li> <li>• Farm consolidation (mostly in relation with construction of new transport infrastructure)</li> <li>• Reduced quality of agricultural products harvested along roads</li> <li>• Reduced quality of recreational areas due to shrinkage, dissection, and noise</li> </ul>
<b>Note:</b>	<p>Examples of the consequences of linear infrastructure facilities such as roads, railways and power lines (not including the effects of construction sites such as excavation and deposition of soils, vibrations, acoustic and visual disturbances). The effects are grouped into seven themes.</p>

Figura 4. Impacto ambientales derivados de la existencia de una infraestructura lineal (EEA/FOEN, 2011)

De todos ellos, los que de forma más importante se derivan directamente de la presencia de desmontes de entidad son los siguientes:

**2.1.1 Alteraciones sobre la geomorfología / favorecimiento de procesos erosivos de deterioro de la geomorfología por formación de cárcavas y barranqueras.**

Este impacto es uno de los más evidentes y que más fácilmente expresan la pérdida de valores ambientales, la cual se da en muchos grandes desmontes en numerosas carreteras de todo el planeta. Así, la erosión hídrica, al impactar contra la tierra desnuda del talud, exenta de cubierta vegetal propiciada por la necesaria capa de suelo fértil, va abriendo pequeños surcos que, más adelante serán cárcavas y que, con el tiempo, podrán llegar a inestabilizarlo y trasladar el daño más allá de a coronación del propio talud.



Figura 5. Desmonte afectado por fuerte erosión superficial en vial urbano, Paterna (Valencia)

Este impacto es perjudicial, asimismo, incluso para la propia infraestructura, pues la misma puede verse afectada en aspectos funcionales de importancia, dado que, admitiendo un mantenimiento

adecuado del tramo para circunstancias normales (lo que supone, entre otras cosas, un buen funcionamiento del drenaje superficial), el progresivo aterramiento de sus cunetas por derrumbes continuados conllevará, durante episodios de lluvia de periodo de retorno bajo, un insuficiente drenaje de la calzada, disminuyéndose la seguridad vial de la infraestructura en el tramo afectado, es decir, generándose fenómenos de aquaplaning, proyección de agua, etc., lo que implica la creación de situaciones de riesgo para las vidas humanas.

### **2.1.2 *Eliminación directa de hábitats (suelo vegetal, vegetación, fauna)***

Este impacto es posible describirlo en base a que uno de los efectos más directos y evidentes que genera la construcción de cualquier infraestructura lineal es la pérdida de los ecosistemas que la nueva explanada sustituye, lo que supone la afección también directa al tamaño de las poblaciones asociadas a aquéllos (Lodé, 2000; Fahrig, 2002). Pero no sólo cabe detenerse en la pérdida de terreno que suman las calzadas, sino que cabe también añadir las superficies que ocupan los desmontes y terraplenes que es necesario ejecutar a razón del encaje de la traza en el territorio en el que se enmarca la actuación. Es así que puede decirse que la eliminación de hábitats que se deriva de la construcción de una carretera se aproxima a los 100 m de anchura (Forman y Deblinger 2000).

### **2.1.3 *Fragmentación de hábitats (muerte por atropello / reducción de la biodiversidad por empobrecimiento genético de las especies)***

El fenómeno de la fragmentación de hábitats ha sido ya mencionado en anteriores apartados, pero es ahora el momento de definirlo y tratarlo en tanto impacto ambiental de relevancia. Así pues, la fragmentación de hábitats seccionados por una carretera (o infraestructura lineal en general), se entiende como la subdivisión en fragmentos de menor tamaño y con problemas de conexión entre sí (Bascompté y Solé 1996).

Todo ello supone la alteración de las poblaciones que habitan los ecosistemas afectados, lo que tiene como consecuencia el menor tamaño de tales poblaciones y el que las mismas queden relativamente desconectadas entre sí (McGarigal y Cushman 2002).

La fragmentación se caracteriza y distingue de la destrucción directa de hábitats por los dos efectos concretos que se han venido citando, como son, de un lado, el menor tamaño de las poblaciones sustentadas en cada tesela de hábitat, lo que supone que aumente su probabilidad de extinción local (por efecto del azar) y, de otro, la disminución de la conectividad, que conlleva la disminución de la probabilidad de recolonización desde áreas próximas junto con la posible aparición de efectos genéticos negativos para la supervivencia de la población (Valladares, F. et al, 2011). Tanto es así que actualmente existe consenso, gracias a las investigaciones de numerosos autores, en torno a que la fragmentación puede ser incluso más perjudicial para la salud del ecosistema atravesado por una infraestructura que la propia destrucción y degradación de hábitats (Robinson et al. 1992; Lindenmayer et al. 1999; Fahrig 2003).

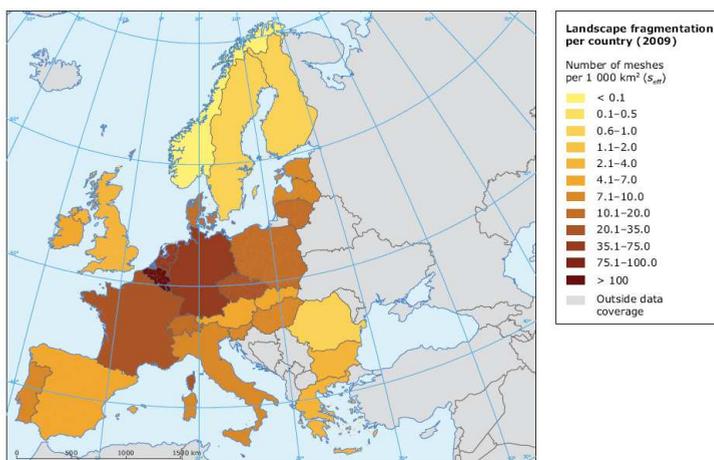


Figura 6. Fragmentación territorial por países en 2009 (EEA-FOEN, 2011)

De entre las distintas formas con que se cuenta para medir la fragmentación de los ecosistemas de un territorio, es el tamaño efectivo de malla uno de los que se considera como más aptos a tal fin. Este tamaño efectivo (effective mesh size en inglés) mide la probabilidad de que dos puntos de un territorio escogidos al azar no queden en fragmentos o teselas de hábitat separados (MMA, 2010). Junto a él, la densidad efectiva de malla, effective mesh density en inglés, se define como el número de mallas por cada 1000 Km<sup>2</sup>, de forma que, cuanto mayor es la densidad de malla efectiva, mayor es la fragmentación del territorio estudiado (van der Reer et al, 2015). Ambos conceptos se emplean en posterior apartado al objeto de abundar sobre los beneficios de determinadas medidas correctoras

Por otra parte, la imposibilidad con que se encuentra la fauna local ante la imposibilidad de paso, supone que, en su necesidad por cruzar las infraestructuras viarias, se incremente la mortandad por atropello. Y es que las carreteras, y en general las infraestructuras lineales de transporte terrestre, pueden suponer un efecto sumidero para las poblaciones próximas a las mismas, lo que las convierte en una seria amenaza para especies cuyas poblaciones sean reducidas y/o que tengan bajas tasas de reproducción (Forman y Alexander, 1998). La trascendencia del problema ha supuesto que el mismo ya tenga un tratamiento especial incluso para infraestructuras de naturaleza reciente, como lo es la red ferroviaria de alta velocidad (Rodríguez et al. 2008).

#### **2.1.4 Impacto sobre el medio perceptual tanto por daño directo a los elementos constituyentes del paisaje, como por afección a las cuencas visuales**

El paisaje no está constituido únicamente por la estética global que se deriva de la mayor o menor armonía con que se presentan los elementos que lo conforman. Así, el impacto de una carretera en el paisaje no debe ser entendido, únicamente, como la alteración estética que la existencia

de la misma supone al irrumpir en un paisaje previamente conformado por una serie de elementos y singularidades propias. Es cierto que tal irrupción supone una perturbación estética que tendrá consecuencias visuales. Pero la citada perturbación va más allá, afectando a los elementos en sí y a la interactuación que se da entre ellos, es decir, al equilibrio que existe en tanto las variaciones de uno afectan al conjunto de todos ellos, es decir, al paisaje. Es así que cabe distinguir entre la que debe ser la integración paisajística de la carretera y la integración visual de la misma, siendo ambas importantes, pero excluyentes.

Desde el punto de vista meramente estético, algunos autores abundan en la configuración de un marco teórico para evaluar la calidad visual de las carreteras constituida por una serie de características. La percepción de la carretera en el paisaje, en su componente visual, queda descrita por un conjunto de varias características, como son coherencia, simplicidad, visibilidad, mantenimiento, naturalidad, integración, contraste, variedad, estética de flujo, legibilidad y orientación (Blumentrath y Tveit, 2014). Ya sea este el marco elegido u otro similar, lo cierto es que, desde este punto de vista, interesará la integración visual de la vía tanto en la cuenca intrínseca, esto es, la de la carretera hacia el entorno, que contará con un número de observadores que estará en función de su intensidad de tráfico, como en la cuenca extrínseca, es decir, desde el entorno hacia la carretera. Es en ella donde deberán localizarse cuantos puntos de observación existan y caracterizarlos en función del número y naturaleza de potenciales observadores.

El impacto visual, pues, dependerá del tanto del tamaño de las cuencas comentadas como del número de observadores potenciales. Por decirlo de forma sencilla, el grado de alteración de las vistas será proporcional al impacto generado.

Si atendemos a la caracterización del paisaje propiamente dicha, esto es, dejando ahora a un lado la componente visual comentada, ha de indicarse que demasiadas veces el paisaje, con toda la amplitud del término, se desglosa y apoya en conceptos más sencillos que, sin embargo, consideran muy escasamente el valor ambiental del paisaje frente al económico (Antrop, 2006).

El no entender el paisaje como un todo frente a su partición en porciones conceptuales viciadas de origen por la visión economicista, como se ha indicado, se entiende que conlleva que la propia evaluación del impacto sobre un valor ambiental de tal magnitud sea casi irreal. Así, para entenderse el impacto sobre el paisaje ha de comprenderse las interrelaciones entre sus elementos, y valorarlos en su justa medida en base a criterios no sesgados.

Hemos venido hablando, hasta aquí y dentro de este punto, del impacto sobre el medio perceptual que puede generar una actuación en materia de carreteras. Pero, realizada tal introducción, y puesto que el objeto de la presente tesis es profundizar en la restauración de grandes taludes de carreteras, se pasa, seguidamente, a hablar de la forma en que generan el impacto los taludes de desmonte existentes en infraestructuras lineales de transporte rodado.

Con todo, el impacto visual y el impacto paisajístico se generarán, pues, cuando los desmontes estén en contradicción con los criterios fundamentales de integración visual, los cuales se indican a continuación (GVA, 2012).

- Paisajístico:

- o Distancia suficiente y no alteración de los recursos paisajísticos.

En este caso, el impacto viene de que el desmonte ya existente se localizó próximo a algún recurso paisajístico del entorno.

- Concordancia con la organización del paisaje (encaje con las líneas de nivel, con la trama del paisaje...)

El desmonte estará, como no puede ser de otra manera, alineado con la traza de la carretera. Si tal trazado está coordinado con las líneas de nivel del terreno el impacto, existiendo, será de menor entidad que si irrumpe en el relieve con ángulos mayores.

- No afección a los componentes principales del paisaje.

Si el desmonte atraviesa una masa boscosa relevante en el paisaje, el impacto será mayor que si la afección se diese de forma tangencial.

- No afección a zonas frágiles (zonas con riesgos o fáciles de desestabilizar antes pequeños cambios,...).

Al igual que en el caso inmediatamente anterior, la presencia de un importante desmonte en una zona de alta fragilidad, altamente sensible a cambios, puede haber favorecido procesos de degradación.

- Visual:

- Adecuación al volumen, escala y altura del entorno.

En este caso puede entenderse que, a igualdad de tamaño de desmonte, los habrá que, con respecto al macizo afectado, aparentarán mucho mayores, lo que estará en función del contexto y condicionará la valoración del impacto visual.

- Minimización del contraste con la textura del entorno.

La textura de un paisaje depende de su grano (tamaño relativo de las irregularidades superficiales), densidad (separación entre las variaciones superficiales), regularidad y contraste interno. La presencia del desmonte, y en función de las características del mismo, supone una alteración del patrón de textura.

- Adecuación al cromatismo del entorno.

Los desmontes existentes podrán tener, en función de su edad y de cómo se trataron inicialmente, unas características cromáticas más o menos homogeneizadas con el entorno, lo que ayude a su mejor o peor mimetización con el mismo.

- No alteración de la dominancia visual de hitos paisajísticos

Se entiende que este criterio no es aplicable al caso de los desmontes en general, puesto que no es posible ocultar un hito existente en un paisaje al practicar un corte en el relieve, con el consiguiente vaciado de material. Esto, sin embargo, sí podría darse en el caso de que se generase un talud de terraplén de cierta entidad, caso que no es objeto de la presente tesis.

## 2.2 Medidas correctoras empleadas

Bajo el presente epígrafe se recogen las técnicas de corrección que actualmente se emplean para la atenuación o eliminación de impactos ambientales relacionados con la existencia de grandes desmontes en carreteras. Las técnicas que se verán a continuación se han agrupado en base a aquellos impactos para los que están indicadas.

No obstante, se da el caso en bastantes de ellas según el cual, aunque estén destinadas o relacionadas con la corrección de un impacto al que se suelen asociar, también conllevan la mitigación de otros también propios del caso estudiado. Es así que, por ejemplo, muchas de las técnicas de corrección de la erosión en taludes suponen, al tiempo, una integración paisajística del talud, pero también una corrección sobre el impacto a la fauna y la flora en tanto generan pequeños ecosistemas sobre los que estas pueden desarrollarse.

Por otra parte, la asociación de estas técnicas entre sí es la que podrá dar lugar a distintas estrategias de restauración de los grandes desmontes, buscándose paliar el conjunto de los impactos ambientales que se den en los mismos. Las distintas posibilidades de combinación de estas técnicas dan enfoques restauradores o estrategias de restauración diferentes. Es así que, para entender bien las posibles estrategias a elaborar, cabe partir del correcto entendimiento de las técnicas que las conforman las cuales, como se dice, son objeto del presente apartado. El alcance del mismo, quiere decirse, se ha dispuesto en base a la que debe ser la función que su descripción requiere.

Con todo, se ha entendido que, en el caso presente, es el conocimiento de su existencia, su definición y su forma de actuar para paliar el impacto sobre el que actúe lo que puede interesar. De ello es que, salvo excepciones que lo justifiquen, se haya entrado en matices relativos a geometrías, características comerciales o procedimientos constructivos.

### **2.2.1 Corrección de impactos sobre la Geología, Geomorfología y control de la erosión**

Para corregir los impactos que supone la generación de taludes de desmonte en carreteras, se tiene una serie de medidas encaminadas a corregir la inestabilidad del talud, el riesgo de desprendimientos y los efectos de la pérdida de suelo vegetal por erosión.

Se describen, seguidamente, las medidas que es posible implementar a tal fin. En este sentido ha de indicarse que han sido muchas las referencias consultadas, puesto que el problema de mitigar las alteraciones generadas por las carreteras, y en particular por la generación de grandes taludes de desmonte en el territorio, se estudia desde hace tiempo. Es así que se ha pretendido acudir a las más recientes, ya sea por cuanto las mismas son novedosas en sí, o bien porque actualizan medidas vigentes hace tiempo.

#### **2.2.1.1 Tendido del talud**

Esta medida consiste en el tendido del talud, esto es, disminuir su pendiente. Al conseguirse pendientes menores, ello redundará en su mayor estabilidad estructural, así como en una mayor facilidad de integración paisajística y ambiental, dado que su revegetación es mucho más sencilla y, por tanto, también lo es su colonización por distintas especies de fauna y flora locales.

Puede pensarse que tal medida, por suponer una mayor afección en planta, no es idónea. Sin embargo, como se dice, su restauración, forzada o no, es muy fácil, con lo que salvo casos muy concretos de afección localizada a valores ambientales muy determinados, se trata de una medida deseable.

En paisajes alomados, esto es, no planos pero tampoco sujetos a una variación topográfica abrupta, el tendido del talud hasta 1:6 (Iuell et al, 2003) implica que su nueva morfología case perfectamente con la geomorfología del lugar en que se inserta, lo que lo convierte en una solución de restauración paisajística óptima. Como se dice, la nueva topografía suavizada conlleva que su colonización sea muy sencilla, especialmente por las plantas herbáceas locales, las cuales son las primeras en iniciar la restauración.

En el caso que se comenta, y garantizada una capa de suelo vegetal de origen local, la restauración no requiere de mayores medidas (siembra, hidrosiembras, plantaciones...) si no es porque se desea inmediatez en la recuperación del paisaje.

#### **2.2.1.2 Drenaje superficial**

Esta medida persigue evitar o minimizar la acción de la escorrentía superficial sobre un talud de tierras. La misma consiste en la disposición de cunetas de guarda en la coronación del talud. Estas cunetas es muy conveniente que sean revestidas de hormigón, así como objeto de un mantenimiento importante. De esta manera que se evita la generación de surcos y, posteriormente, cárcavas que, finalmente, pueden terminar por arruinar el talud.

#### **2.2.1.3 Drenaje profundo**

Existen diferentes tipologías de solución al respecto (drenes horizontales, pozos drenantes verticales,...), las cuales tienen en común la premisa de conseguir reducir el empuje del agua sobre el talud, a fin de conseguir un menor riesgo de deslizamiento del mismo. Así, por ejemplo, los drenes horizontales suponen una opción consistente en la introducción de tuberías agujeradas que se introducen transversalmente en los desmontes, de forma que se alivian las presiones intersticiales.

#### **2.2.1.4 Anclajes (defensa activa)**

Este tipo de medidas consiste en la estabilización del talud mediante procedimientos mecánicos que buscan sostener la cara desnuda del desmonte con la matriz sana (rocosa en su caso) de la montaña. Para ello se procede, inicialmente, saneando la superficie del talud. Posteriormente se dispone una malla de acero de triple torsión sujeta mediante bulonado<sup>1</sup>, y se cubre de una capa de tierra vegetal sobre la que se practica una hidrosiembra a fin de que,

---

<sup>1</sup> anclajes de acero embebidos en el taladro y sujetos al mismo mediante lechada de mortero o resinas

quedando sujeta por la propia malla, la oculte y favorezca su integración en el paisaje.

### ***2.2.1.5 Vallas de retención (defensa pasiva)***

Esta medida consiste en la creación de cunetas de recogida de piedras y/o disposición de elementos de retención. Estos últimos, es decir los elementos de retención, constan de postes con tirantes de anclaje y mallas metálicas dimensionadas para soportar el impacto de una roca desprendida.

### ***2.2.1.6 Muros***

Una posible solución de restauración de desmontes importantes en carreteras existentes son los muros, en sus distintas variantes y funcionalidades. En el caso que nos ocupa, el común denominador debe ser su mejor integración medioambiental. Desde ese enfoque, y sin poder perder de vista que lo que se busca es restaurar situaciones existentes, y no de proyecto, las tipologías de muro que cabe contemplar se entiende que son las que se describen a continuación:

- Muros ecológicos, también conocidos como muros verdes.
- Muros de gaviones
- Muros de escollera
- Muros de mampostería
- Muros de contención de hormigón armado con aplacado de mampostería

Asimismo, ha de tenerse en cuenta que, en algunos casos de restauración, deberían acompañarse de una actuación sobre el propio talud por ser, como se dice, éste ya existente. Es decir, si se pretende restaurar un desmonte existente en base a alguna de las soluciones ahora referidas, es muy posible que, por necesidades estructurales, el propio muro necesite que se lleven a cabo actuaciones en el trasdós. Por ejemplo, es muy posible que necesite que se

practique un retranqueado del talud a fin de que el relleno del citado trasdós, en las condiciones técnicas que la técnica en ejecución exija, sea viable.

#### **2.2.1.6.1 Muros ecológicos (verdes)**

Bajo tal denominación se hace referencia a los muros de suelo con armaduras de refuerzo. Algunos casos particulares de estos son:

- Muros de tierra armada: se construyen en base a la disposición de pletinas de acero de forma perpendicular a la superficie del muro. Las pletinas tienen un diseño tal que aumentan el rozamiento con el material de relleno del talud, gracias a unas rebabas o corrugas transversales que favorecen tal efecto. Estas pletinas se colocan, para cada tongada de tierra de espesor determinado. Es así como se consigue el cosido de las escamas prefabricadas de hormigón que, de forma vertical, cerrarán el intradós, tras amarrarse a las citadas pletinas, generando la característica piel tan común en terraplenes de numerosos puentes de carretera. Esta técnica necesitará de un espacio suficiente entre la cara del talud y la piel de escamas, puesto que las pletinas requieren de una longitud suficiente para ser eficientes. Asimismo, si bien minimiza la ocupación en planta, no presenta ventajas ambientales adicionales.
- Muros jardinera: constituidos por cintas de geotextil que abrazan el terreno y culminan en fachada con jardineras prefabricadas de hormigón en las que, posteriormente, se disponen especies tapizantes preferentemente. Su uso es muy efectista, dado que basa su ventaja en el beneficio estético. Sin embargo, esta es una contribución nada desdeñable para la que es la perspectiva de la presente tesis.
- Muros vegetalizados: se trata de muros construidos según la sucesión de capas de tierra embebida en un geotextil de longitud determinada. De esa forma, se va generando, por cada tongada, un talud vertical de gran estabilidad, en el que el trabajo mecánico de soportación del mismo es realizado por la sucesión de geomallas comentada. La cara vista del talud generado albergará suelo vegetal que permitirá el desarrollo de especies herbáceas, contribuyendo a la generación de hábitats.

### **2.2.1.6.2 Muros de gaviones**

Los muros de gaviones, o en gaviones, son una solución muy buena en taludes rocosos con problemas de estabilidad, dado que se mimetizan muy bien con tales ambientes. Su versatilidad y capacidades los hace aptos para múltiples usos. Si bien son soluciones propias de proyecto, son también una buena medida correctora en taludes existentes.

Están formados por piezas prismáticas fabricadas con malla de alambre, generalmente de triple torsión. Dentro de las mismas se disponen mampuestos rocosos de forma más o menos ordenada y, una vez cerrados, se apilan según una pauta construyendo un muro modular de dimensiones muy variables.

### **2.2.1.6.3 Muros de escollera**

Los muros de escollera son una solución que, al igual que los de gaviones, son propias de la fase de proyecto.

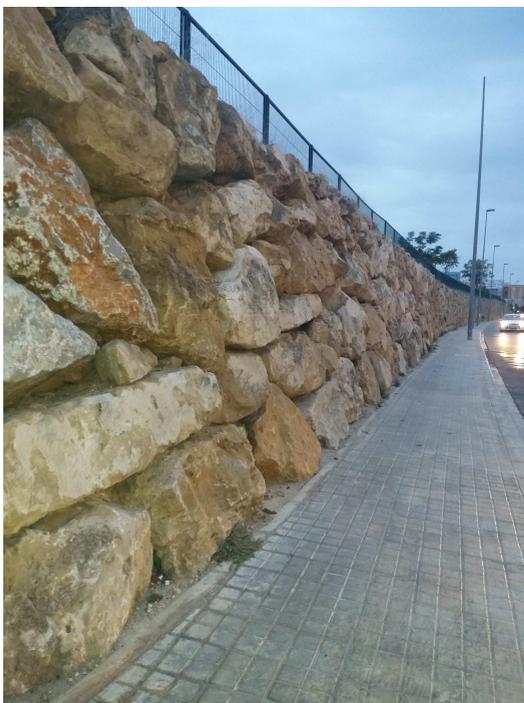


Figura 7. Vista de muro de contención de escollera en vial urbano (MFO, 2006)

Es decir, cuando se está ante la disyuntiva de generar un corte en un relieve colinado o abrupto, podrá estudiarse la conveniencia de dejar el talud desnudo frente a la disposición de un muro de contención en base a numerosos condicionantes. Si, como es el caso que nos ocupa, en su momento se optó por practicar un desmote, fue en base a una argumentación técnica determinada.

A efectos de la presente tesis, sin embargo, los muros de escollera, como los de gaviones antes, interesan en

tanto son una técnica de corrección de un impacto geomorfológico y paisajístico reseñable. Es por ello por lo que se ha querido recoger aquí tal tipología de muro.

La tipología de muro que ahora se describe está compuesta, como su nombre indica, por escollera colocada (frente a la vertida o compactada), esto es, por bloques de roca irregulares, de forma poliédrica, sin labrar y de gran tamaño (masa comprendida entre 300 y 3000 kg), que se colocan uno a uno mediante maquinaria específica, con funciones de contención o sostenimiento (MFO, 2006).

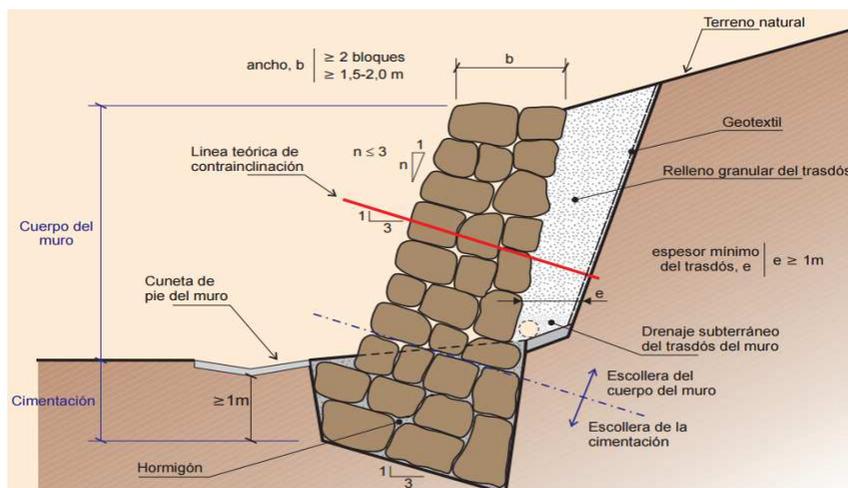


Figura 8. Geometría de un muro de contención de escollera de carretera (MFO, 2006)

Al tratarse de grandes bloques de roca de características determinadas, le confiere unas ventajas de integración ambiental evidentes frente a otras tipologías referidas anteriormente. El hecho de que la escollera pueda ser propia de la zona en la que se procede a la corrección, supone que la roca empleada mantenga las características de las de la zona de actuación lo que, como se dice, facilita su integración.

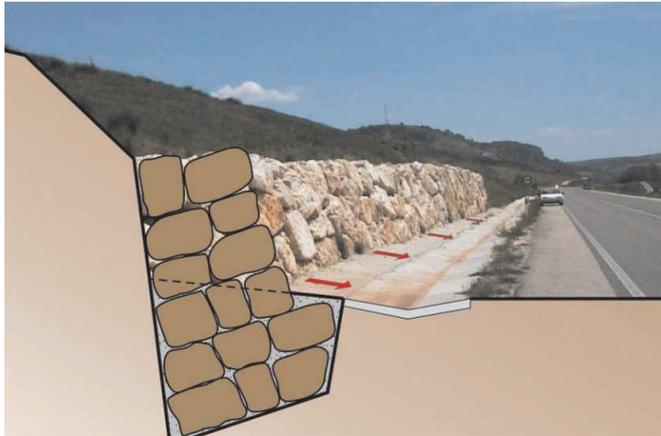


Figura 9. Muro de escollera en desmonte de carretera (MFO, 2006)

#### **2.2.1.6.4 Muros de mampostería**

Los muros de mampostería son otra solución de buena integración paisajística en taludes de desmonte practicados en roca. No obstante, sus capacidades no



Figura 10. Muro de mampostería

son tan amplias como otras tipologías mencionadas en el presente documento (gaviones, escollera...), por lo que quizás tendrían menor aplicación en casos como el que nos ocupa, y que atiende a grandes desmontes. Sin embargo, dada su versatilidad y la posibilidad que ofrecen de complementar a otras soluciones, ha querido recogerse aquí.

Existen varias tipologías, según su forma constructiva. Seguidamente se realiza una somera descripción de las mismas.

- Mampostería en seco: No se emplea ningún mortero para el caso en que se empleen mampuestos en seco. Hay que disponer los referidos mampuestos los unos sobre los otros de forma que el conjunto alcance, por sí solo, estabilidad suficiente. Asimismo, se usan piedras de un tamaño mucho menor, a las que se suele denominar como ripios, para afianzar los mampuestos y rellenar los huecos que hayan quedado entre éstos.
- Mampostería ordinaria: En este caso la fábrica ejecutada se lleva a cabo con mortero, bien de cal o bien de cemento. Los mampuestos deben también haberse previsto con formas que favorezcan el encaje entre los mismos, a fin de minimizar el tamaño de los huecos y, de esta forma, la necesidad de mortero que los rellene.
- Mampostería careada: Se denomina así a la fábrica cuyos mampuestos han sido objeto de labrado únicamente en la parte destinada a formar la cara vista del muro. En este caso, los elementos que conforman el muro no deben ajustarse a formas o dimensiones determinadas.
- Mampostería concertada: en este caso, la fábrica está constituida por mampuestos los cuales han sido objeto de labrado tanto en las caras que conformarán los paramentos, como las que darán lugar a las juntas y, por tanto, permitirán el apoyo de unos con otros. Al labrarse según superficies más o menos planas, el encaje es mejor.

### **2.2.1.6.5 Muros de hormigón armado con aplacado de mampostería**

No se ha hablado, en el presente apartado, de muros de gravegad, de hormigón armado, hincados, de chapa grecaga u otras tipologías de gran capacidad que no presentan una buena integración ambiental. Y es que lo que se busca ahora es describir aquellas técnicas de ingeniería que, cumpliendo una función resistente adecuada a las exigencias del caso que se presente, tengan una fácil integración ambiental y paisajística.

Los muros de contención de hormigón armado, como se dice, descubren un intradós muy artificial que hace muy difícil su integración paisajística. Sin embargo, existe una solución que, si bien se antoja bastante artificial, resuelve de manera bastante aceptable este problema. Ello consiste en la disposición de aplacado de mampostería en el intradós del muro de hormigón armado. De esta forma, y como se dice, la función de contención la realiza el muro de hormigón el cual, sin embargo, queda oculto tras el aplacado de mampostería.

### **2.2.1.7 Aterrazamiento**

Es esta una forma general de hablar tanto de la generación de bermas intermedias, lo que se hace en función de los materiales que constituyen el talud de desmonte, pudiéndose ejecutar tales bermas de pequeño ancho (entre un metro y metro y medio) al objeto de mejorar el comportamiento estructural del citado desmonte, o bien abancalamientos más amplios que, si bien supondrán una ocupación en planta mucho mayor, facilitarán la regeneración de la nueva área y su mejor integración ambiental.

El aterrazamiento puede darse bien mediante la generación de bancales de un ancho de en torno a un metro y medio o dos metros, y en contrapendiente, a fin de facilitar la contención del agua de lluvia y, por tanto, el favorecimiento de la vida vegetal sobre la misma. Tales bancales discurren a una misma cota, aproximadamente, y a lo largo de longitudes que, habitualmente, recorren gran parte del talud.

También es posible llevar a cabo esta técnica ejecutando microcuencas. Esto consiste en la ejecución de pequeñas bermas de planta semicircular que jalonan

todo el talud pero siguiendo una pauta o patrón, de forma que cualquier gota de agua precipitada que parta de la coronación del talud, vaya a encontrar, en algún momento y en su descenso hacia la línea de caída de tierras, una de tales pequeñas bermas. Es decir, no es correcto colocarlas según columnas sino que, a modo de un muro de sillares, las filas inferiores se intercalan en las superiores, generando columnas irregulares que favorecen el efecto antes comentado.

En los dos casos se maneja el mismo principio, persiguiéndose minimizar el arrastre de suelo fértil y mantener la humedad en el entorno de la vegetación implantada en las terrazas, a fin de favorecer la restauración del talud sobre el que se actúe. Ha de decirse, finalmente, que esta técnica está muy indicada para pendientes grandes y taludes de longitud significativa.

#### **2.2.1.8 Actuaciones sobre el suelo vegetal del talud**

Esta solución supone el restablecimiento de una cubierta vegetal sobre los taludes de desmonte. Su valor tanto paisajístico como medioambiental, en tanto favorece la creación de nuevos hábitats, la convierte en una de las medidas más valiosas. Sin embargo, su efectividad requiere de la consideración de una serie de importantes parámetros locales, como son:

- Pendiente del talud
- Orientación
- Climatología
- Aireación y textura del suelo
- Contenido en materia orgánica
- Características químicas, pH
- Salinidad
- Selección de especies y épocas de plantación

Los parámetros anteriores, como se dice, condicionarán el éxito de la revegetación. Es por ello que será muy importante tenerlos presentes tanto para elegir el procedimiento de ejecución, el material vegetal a emplear, etc.

Como se desprende de la relación de parámetros dada, las características del suelo son muy relevantes para la correcta resolución del problema. Lo habitual, y conveniente, es que el suelo vegetal extendido (restitución edáfica de los taludes) sea el que previamente se ha retirado durante las obras de ejecución de la vía. En el caso que nos ocupa esto no es, en principio, viable, dado que se plantea abordar casos de grandes desmontes que presumiblemente ya fueron ejecutados tiempo atrás. En tal caso, el aporte de tierra vegetal debe ser de préstamo, y es por ello que debe esperarse que sus características constitutivas sean acordes al lugar de empleo.

Una vez se ha restituido la cubierta vegetal del talud, es posible proceder a su revegetación, la cual podrá constar de dos etapas, en función del desarrollo de las especies vegetales a implantar. Serán, pues, las siguientes:

- Plantaciones: se trata de la colocación de plantones o pies arbóreos de especies autóctonas y bien adaptadas a las condiciones del emplazamiento en que se localizan.
- Sembrado: en relación con el procedimiento a emplear para ello, se tiene que este puede realizarse según alguno de los métodos ahora expuestos:
  - o Siembra: se trata del sistema más sencillo, consistiendo, como su nombre indica, en el sembrado de especies herbáceas, autóctonas preferentemente. Normalmente se practica mediante la proyección de agua con abonos líquidos y semillas sobre el suelo vegetal previamente extendido.

- Hidrosiembra: en este caso, lo que se proyecta sobre la cubierta de suelo vegetal repuesta es una mezcla acuosa de mulch<sup>2</sup>, semillas herbáceas, fertilizantes y estabilizantes, los cuales facilitan la fijación de la solución al talud. Estola hace más adecuada para taludes de elevada pendiente y difícil acceso.

Esta técnica ahora descrita está asumida como propia de la disciplina técnico-científica de la bioingeniería dado que, conceptualmente, encaja en la definición que para tal disciplina se tiene. Sin embargo, a efectos del presente trabajo, se han separado puesto que, al presentar una artificialidad mucho menor y costes diferentes, más adelante se emplearán de forma distinta en la configuración de las estrategias de restauración propuestas.

Ha de insistirse en que tales estrategias no se ocupan únicamente de la atenuación de un impacto, como así es el caso de estas técnicas, sino que pretenden cubrir la globalidad de la restauración del desmonte. Así, si la revegetación del talud podrá suponer una importante medida correctora para controlar la erosión superficial y aumentar hasta niveles seguros la estabilidad del talud, esta no puede, por sí misma, corregir las alteraciones que la existencia de los desmontes suponga sobre la fauna o la permeabilidad territorial.

Es por ello por lo que, como se ha adelantado en anterior apartado, y se verá en posterior, se ha trabajado sobre estrategias de restauración, las cuales están conformadas por un paquete de varias medidas correctoras, cada una de las cuales atiende, como se dice, a un o varios impactos concretos, pero no a todos.

---

<sup>2</sup> Se trata de un elemento constituido por material orgánico (celulosa, serrín, paja...) e inorgánico (fibra de vidrio, emulsiones bituminosas...) el cual se incorpora a un suelo vegetal, ya sea a través de la misma hidrosiembra o de otro modo, con una finalidad protectora y estabilizadora.

### **2.2.1.9 Técnicas de bioingeniería**

Por técnicas de bioingeniería se entiende el conjunto de soluciones constructivas que emplean materiales vegetales vivos, solos o combinados con materiales inertes como piedra, madera o acero (NTJ 12S, 2013), en pro de la estabilización de los taludes objeto de restauración, del control de la erosión sobre los mismos y de la creación de nuevos ambientes naturales que sirvan de soporte a la biodiversidad de la zona sobre la que se actúe.

Existen distintas técnicas de esta índole, muchas de las cuales se emplean cuando, por las condiciones propias del talud, se hace más difícil aplicar sembrados, hidrosembrados o similares. Asimismo, su empleo está también condicionado a su mayor coste frente a otras ya descritas por lo que, aunque sea viable la ejecución de todas ellas, su elección está sujeta a otros condicionantes relacionados con la eficacia o durabilidad que pueden aportar.

Seguidamente se realiza una exposición de este tipo de técnicas, las cuales son cada vez más habituales en las carreteras de Europa y, en general, de todo el planeta.

#### **2.2.1.10 Estaquillados**

Consiste en la colocación ramas de plantas leñosas con un grosor suficiente para hincarlas en el suelo y una longitud, entre 0.50–1.0 m, capaces de enraizar y desarrollarse (NTJ 12S, 2013; Ramajo y Giráldez, 2014). Sus raíces estabilizarán el suelo, reforzándolo y dotándolo de mayor cohesión, con lo que se conseguirá incrementar de forma muy

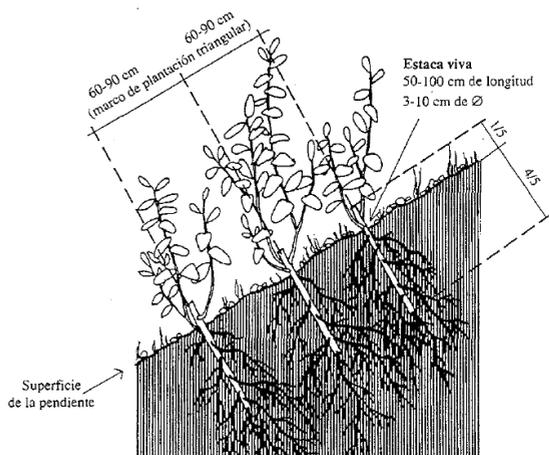


Figura 11. Estaquillado (NTJ 12S, 2013)

significativa la resistencia al deslizamiento.

### **2.2.1.11 Fajinas vivas**

Se trata de elementos cilíndricos compuestos por especies leñosas vivas (ramas o similares). Se disponen en la dirección de las curvas de nivel del talud y se fijan a la superficie del terreno con ayuda de estacas. Habitualmente, se practican unas zanjas de poca profundidad sobre las que se procede a la extensión de las fajinas (Ramajo y Giráldez, 2014).

Es de destacar que esta técnica presenta gran efectividad contra deslizamientos superficiales (30-60 cm de profundidad), y para la estabilización de taludes con pendientes de 30-35°, como máximo. Asimismo, es muy efectiva contra procesos erosivos superficiales y, además, supone la creación de microhábitats en los que es posible el desarrollo de plantas (NTJ 12S, 2013).

### **2.2.1.12 Biorrollos**

Los biorrollos son también elementos cilíndricos compuestos por un saco exterior, de materiales que van desde la fibra de coco, polipropileno, polipropileno multifilamentado, poliéster de alta tenacidad hasta el nylon u otras fibras y que presenta gran resistencia a la acción del agua. Este saco va reeno de diferentes fibras orgánicas como el coco, la paja, el esparto o fibras sintéticas como el polipropileno, que suele ser fotodegradable. Se pueden suministrar semillados (Ramajo y Giráldez, 2014).

Se suelen emplear como alternativa a las fajinas vivas. Ambas técnicas presentan una instalación muy similar. Son también muy convenientes en la restauración de cárcavas y barranqueras, siendo crucial en este uso un anclaje apropiado que evite la socavación del biorrollo o su desplazamiento por el agua de escorrentía. Tienen como ventajas más significativas, su fácil aplicación, su adaptabilidad a zonas con pendiente elevada, su impacto visual bajo y su fácil combinación con mantas orgánicas, favoreciendo la retención de sedimentos y la reducción de la energía de la escorrentía (Ramajo y Giráldez, 2014).

### **2.2.1.13 Lechos vivos**

Esta técnica consiste en introducir en el suelo ramas verdes de arbustos o de especies leñosas, que tengan la posibilidad de enraizar, en líneas sucesivas

horizontales a lo largo de las líneas de igual nivel del talud (Ramajo y Giráldez, 2014).

La disposición de las referidas ramas es aproximadamente perpendicular al talud, y la forma de su ejecución le permite, amén de la tipología de especie vegetal que se emplee, soportar derrubios y posibles enterramientos puntuales.

#### **2.2.1.14 Peldaños de leña**

Esta técnica, que consiste en la implantación de estacas vivas en pequeñas terrazas excavadas, y reforzadas mediante la disposición de restos de material vegetal leñoso, presenta dos ventajas adicionales (NTJ 12S, 2013) que la diferencian de otras similares, como son que:

- De un lado, las ramas muertas de coníferas que se sitúan en el lecho de los peldaños actúan a modo de armadura, lo que confiere gran estabilidad al talud.

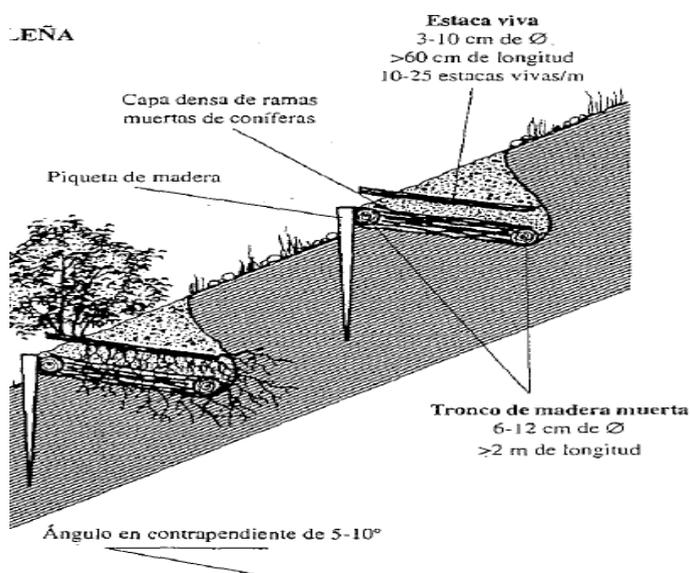


Figura 12. Peldaños de leña (NTJ 12S, 2013)

- De otro, se favorece un reforzamiento del suelo una vez se desarrollan las raíces, al impedir su desplazamiento o rotura.

### **2.2.1.15 Trenzados de leña**

Esta técnica supone la ejecución de una estructura conformada con troncos y ramas vivas entrelazadas, las cuales se disponen a modo de cajones (NTJ 12S, 2013). Una de las ventajas que ofrece es que permite su ejecución en taludes con pendientes muy importantes.

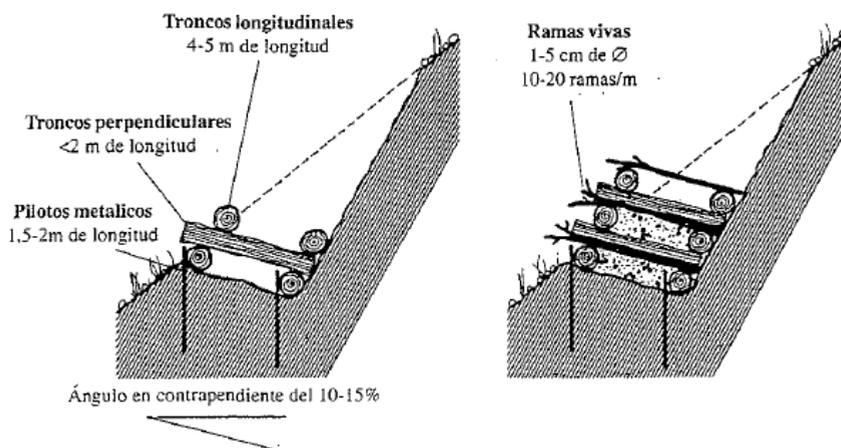


Figura 13. Trenzados de leña (NTJ 12S, 2013)

### **2.2.1.16 Geosintéticos**

Para los casos en los que la hidrosiembra por sí misma no sea suficiente, bien por las características del material constituyente del talud, o bien porque su pendiente supere la 1V:1H, es posible recurrir a estas soluciones, las cuales consisten en materiales cuya finalidad es la de retener el suelo entre los intersticios de su estructura, no permitiendo su pérdida y favoreciendo el crecimiento de especies vegetales herbáceas en él, generándose una cubierta vegetal fruto de una hidrosiembra u otro sistema de igual finalidad.

Es posible clasificar los geosintéticos de diferente forma en función de la característica principal a la que se atiende. Si lo hacemos atendiendo a su temporalidad, se tienen los siguientes tipos:

### **Efecto temporal:**

- Mantas orgánicas: en este caso se trata de fieltros con materiales naturales orgánicos, como pueden ser coco, yute o paja. Por tanto, y por definición, no van tejidos. Se disponen sobre una malla de hilo de polipropileno de naturaleza fotodegradable. De esta forma, permiten el desarrollo de las plantas herbáceas las cuales, al desarrollar su sistema radicular, sostienen el suelo cuando, una vez cumplida su función y fruto del deterioro esperado, la malla deja de trabajar, desapareciendo progresivamente y, con ello, naturalizando aún más el talud objeto de protección.



Figura 14. Manta orgánica en talud de carretera, Paterna (Valencia)

- Geomallas orgánicas: se trata de redes (es decir, la superficie de hueco supera a la del material en sí) que de han trenzado con fibras de coco, yute o paja. Estas realizan una función muy similar a la descrita para las mantas orgánicas, pero presentan una mayor duración.

- Geomallas sintéticas de espesor delgado: esta solución, de igual funcionamiento que las anteriores, se lleva a cabo mediante materiales sintéticos que se degradan bajo la acción de los rayos ultravioleta.

### **Efecto permanente:**

- Geoesteras: consiste en cuerpos fabricados bien en base a filamentos poliméricos entrelazados o bien en geo-redes soldadas entre sí, de nylon o polipropileno y polietileno de alta densidad (HDPE). Su uso es posible en taludes de hasta 60°, funcionan bien para escorrentías altas y presentan una vida útil larga.

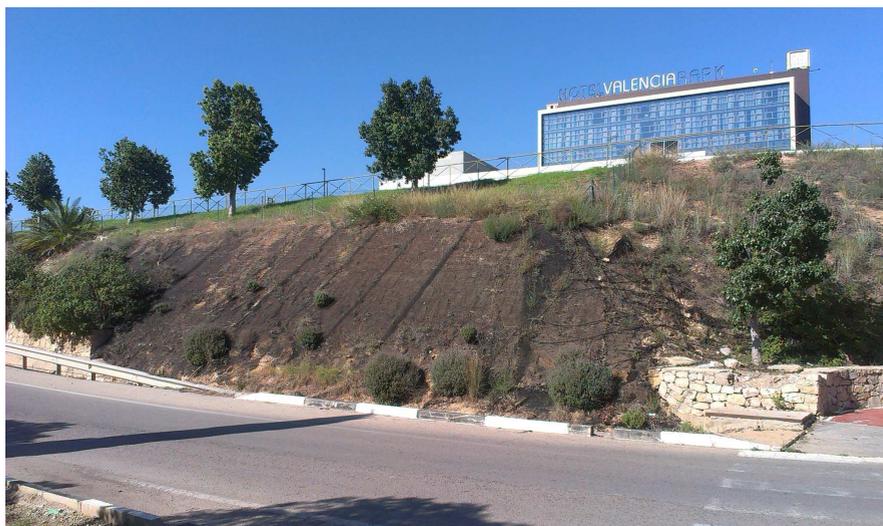


Figura 15. Geoestera en talud de carretera, Paterna (Valencia)

- Geoceldas: se trata de estructuras tridimensionales en manta, conformadas por células dispuestas, la mayor de las veces en forma de panel de abeja, dentro de las cuales es posible disponer espesores importantes de suelo vegetal (entre 7 y 25 centímetros). Su empleo es adecuado en pendientes de hasta 45° y para casos de escorrentías medias.

- Geomallas volumétricas: se trata de sistemas tridimensionales constituidos por varias mallas termosoldadas las cuales han sido objeto de tratamientos a fin de que puedan resistir la radiación ultravioleta. Su uso es posible en pendientes muy pronunciadas.

### **2.2.2 Corrección de la fragmentación de hábitats e impacto sobre la fauna**

La fragmentación de hábitats es uno de los impactos de mayor importancia de cuantos generan las vías de comunicación rodada. Dentro de estas, los grandes desmontes suponen, muy a menudo, la generación de fracturas casi insalvables en áreas de extensión significativa. Las medidas que pueden establecerse para paliar estas alteraciones son muy diversas, y pueden ser clasificadas distinguiendo dos tipologías básicas (Valladares et al, 2011):

- a) en función de su ubicación respecto a la vía (inferior frente a superior).
- b) dependiendo del diseño (si el paso está pensado para uso exclusivo de la fauna frente a diseños mixtos fauna- humano).

Sin embargo, la diferenciación entre los distintos tipos de soluciones está llena de matices. Es por ello por lo que se entrará a describir las soluciones actualmente empleadas en este campo en base a sus características funcionales, y no en relación a las pequeñas diferencias que las caracterizan.

Ha de decirse que los cerramientos perimetrales no son, en sí mismo, una medida de corrección de la fragmentación territorial. Pero, en tanto medida correctora encaminada a la mitigación del impacto sobre la fauna, al objeto de minimizar el número de atropellos, se entiende asimismo complementaria de las que se describirán seguidamente para la corrección de la fragmentación referida. Esto se dice en base a que la fauna no cruza una vía por donde se le indica, sino por donde entiende mejor, de acuerdo con las que son sus pautas de comportamiento. Es así que, en las proximidades de los puntos de cruce previstos, los cerramientos tienen una función de guía hacia los puntos

indicados, permitiendo que la efectividad de los mismos sea satisfactoria al fin perseguido.

Como se ha dicho, seguidamente se aporta una descripción de las técnicas de corrección de la fragmentación de hábitats actualmente empleadas en casos de infraestructuras viarias.

### ***2.2.2.1 Obras de drenaje transversal (culverts)***

Las obras de drenaje trasversal son estructuras básicas en las infraestructuras lineales, siendo, normalmente, muy numerosas a lo largo del trazado. El hecho de que la traza intercepte numerosas cuencas de pequeñas vaguadas o barrancos, cuando no de cauces de mayor entidad, obliga a construir obras de drenaje que atraviesen la carretera a intervalos frecuentemente inferiores a los 500 metros (Valladares et al, 2011).

Estas obras suelen presentar geometrías y dimensiones muy diferentes, en función de las condiciones de la pluviometría local y de la cuenca interceptada. Así, es posible encontrar desde tubos de materiales (hormigón, PVC...) y diámetros relativamente pequeños (normalmente por encima del medio metro, al objeto de evitar atascamientos) hasta cajones de hormigón armado (in situ o hincados) o bóvedas prefabricadas de hormigón armado o chapa grecada de acero, todos ellos ya de dimensiones significativas (con varios metros de luz y gálibo). Puesto que estas estructuras son fundamentales para el correcto servicio de la infraestructura y son, como se dice, muy frecuentes, son especialmente atractivas al objeto de añadirles una función adicional y encaminada a la permeabilización de la vía. Para el caso de la fauna, que nos ocupa, esta función ha sido demostrada en distintos estudios realizados a tal efecto (Clevenger et al. 2001; Mata et al. 2005).

Por todo lo dicho, adaptar de las obras de drenaje, ya sean existentes o en fase de diseño (prefabricados) a fin de que faciliten su uso por parte de la fauna es una de las medidas más socorridas debido a su relación coste-beneficio. La adaptación pasa por facilitar el paso a los animales cuando el culvert pueda estar inundado. En tal caso, ya sea en obras existentes o prefabricadas, pueden disponerse aceras o banquetas laterales (dry-ledges) a una altura suficiente de

la lámina de agua previsible para avenidas ordinarias, de forma que los individuos de las distintas especies locales que puedan emplearlos, lo hagan de manera efectiva.

Asimismo, la adaptación comentada para por aumentar las dimensiones del paso, en la medida de lo posible, incrementar la luminosidad a fin de evitar o minimizar el efecto túnel que perciben los individuos que pretendan cruzar (Hervás et al, 2006), para lo que es conveniente que el paso a modificar mantenga un índice de apertura<sup>3</sup> satisfactorio. Por último, ha de facilitarse que las soleras se naturalicen o, cuando menos, que sean de materiales aptos para las especies que pueden utilizarlos.

Es también importante, más allá de las dimensiones y materiales empleados en la modificación de los culverts, el propiciar el acceso a los mismos mediante la colocación de vegetación.

### ***2.2.2.2 Pasos inferiores mixtos***

Los pasos inferiores en los que se ha previsto, como solución para el aumento de la permeabilidad territorial, el uso conjunto por parte de humanos, ya sea peatonal o con vehículos a motor, y de la fauna, requiere de consideraciones especiales a razón del objetivo perseguido, es decir, tal uso mixto. No todas las especies que puedan usarlo tendrán los mismos estándares, con lo que a unas, de menor tamaño normalmente, les podrán valer unas dimensiones que a otras no les serán suficientes para atreverse a emplearlo. Para que tal uso sea viable, pues, se recomienda que la luz libre entre cajeros del paso sea, como mínimo, de 10 metros. Aun así, los ungulados podrán exigir luces mínimas de entre 25 a 30 metros, por su mayor sensibilidad a los ruidos y luz (Iuell et al. 2003).

No se entrará aquí en las características de diseño que debe tener un paso de estas características, pues no es ese el alcance del presente apartado. Sin

---

<sup>3</sup> El índice de apertura es una relación entre la sección del paso y su longitud, de forma que, cuanto más pequeño es, más dificultades se entiende que tendrá la fauna para cruzarlo por ser mayor el efecto túnel.

embargo sí es conveniente hacer una serie de consideraciones sobre este tipo de pasos:

- los pasos inferiores mixtos venidos de la adaptación de pasos ya existentes, funcionan mejor en casos de intensidades de tráfico bajas.
- Es idónea la adaptación de los pasos existentes en caminos rurales y pistas forestales.
- Los pasos con capa de rodadura no bituminosa funcionan mejor que los restantes. En todo caso, es muy recomendable la disposición de una franja de tierra a lo largo del paso, a fin de mejorar las condiciones para el trasiego de la fauna.
- Es conveniente, asimismo, la colocación de materiales naturales (montones de leña, tocones de árboles...) para generar refugios.
- El acceso al paso es fundamental que guarde unas condiciones de naturalidad suficientes, a fin de favorecer el acercamiento de los animales a la boca del paso.

### ***2.2.2.3 Pasos inferiores exclusivos para fauna***

En principio, cabe pensarse que los pasos inferiores exclusivos para la fauna no son una medida que quepa dentro del objeto de la presente tesis, dado que lo que se pretende ahora es restaurar situaciones reales (no de proyecto) en las que será altamente difícil poder recuperar un supuesto paso inferior existente, como tal paso específico de fauna. Esto se dice en base a que ese supuesto paso inferior existente, pensado y diseñado en su momento para permeabilizar la vía de cara a usos antrópicos, presumiblemente no dispondrá de las dimensiones y demás características que lo hagan apto al uso exclusivo por parte de la fauna local. Sin embargo, podrá modificarse y adaptarse, si no para todas las especies que potencialmente podrían emplearlo, para un porcentaje determinado de las mismas. Es por ello por lo que se incluye en el presente documento en tanto técnica correctiva disponible actualmente.

Estos pasos consisten en estructuras que se sitúan bajo la traza, y que persiguen facilitar los movimientos, a través de la vía, que de forma natural realizan los animales. Son pasos, esos sí, que van más encaminados al paso de vertebrados de talla mediana y grande (Iuell et al, 2003). Si bien pueden llevar a cabo también una función de drenaje (lo que supone unas mayores condiciones de naturalización del paso), ha de indicarse que sus dimensiones y características están únicamente condicionadas por los requerimientos que parten de sus potenciales usuarios, es decir, las especies que habitan en el entorno y que podrán tener unas exigencias, u otras, a la hora de emplearlo.

Estas estructuras, al igual que las vistas en los casos de paso inferior ya descritos anteriormente, pueden ser de tipología estructural diversa, esto es, desde marcos de hormigón armado hasta puentes de vigas, pasando por estructuras abovedadas prefabricadas de hormigón o acero. Sin embargo, dado que se destinan al paso, como se ha dicho, de animales de cierta entidad en cuanto a su tamaño, así también sus dimensiones deberán ser presumiblemente mayores que las habituales para culverts modificados o pasos inferiores de uso mixto. De ahí que los pasos inferiores de uso específico para la fauna suelen ejecutarse como puentes antes que como cajones o elementos similares. Y de ahí también que, puesto que lo que nos interesa en la presente tesis es la restauración de situaciones existentes, sean tales pasos, esto es, pequeños puentes de carretera, los que admitan su conversión en pasos específicos para fauna.

#### ***2.2.2.4 Pasos superiores exclusivos para fauna***

Los pasos superiores exclusivos para el uso de la fauna son estructuras elevadas que cruzan la traza de la vía por encima de la misma, evitando la interferencia con la corriente de tráfico, y que están diseñados en base a los requerimientos a tal efecto venidos de las especies locales, fundamentalmente medianos y grandes vertebrados (Iuell et al, 2003). Estas estructuras se diferencian de los puentes habitualmente destinados al uso humano en lo siguiente (Valladares et al, 2011):

- Necesidad de establecer cierta cantidad de vegetación sobre la estructura. Esto va a suponer que, puesto que los pasos son estructuras artificiales,

habitualmente de hormigón y acero, los espesores de tierra que sea posible disponer estén limitados por las características resistentes de tales estructuras y, en última instancia, por el coste de la estructura. Es así que en la mayor parte de los casos se opta porque estos espesores no sean muy grandes. Y es que, para que pueda desarrollarse vegetación arbórea se necesita de un espesor mínimo de suelo de 1.50 metros (Iuell et al, 2003). En todo caso, y a razón de lo dicho, la vegetación que es posible implantar no puede desarrollar sistemas radiculares muy extensos. Por lo que lo habitual es que tal vegetación sea de naturaleza herbácea o arbustiva.

- Reducción del efecto túnel que pueden percibir los animales en el paso, lo que supone la necesidad de anchos recomendables de 40 metros y mínimos de 20 metros (Iuell et al, 2003).
- Disminución de la perturbación del paso por el tráfico que circula bajo él.

Dado que este tipo de pasos deben responder a las exigencias de distintas especies presentes en el ecosistema fragmentado, es una práctica recomendable el prever, sobre su tablero, la reproducción de ambientes diferentes cada uno de los cuales se ajusta a los requerimientos de unas u otras especies usuarias. Así, una parte del tablero puede albergar un tipo de vegetación herbácea y arbustiva mientras que la restante pueda incluir incluso vegetación arbórea, pese a la dificultad, que no imposibilidad, antes comentada.

### ***2.2.2.5 Ecoductos***

Los ecoductos (Valladares et al, 2011), o también landscape bridges (Iuell et al, 2003), son estructuras que, como los pasos superiores vistos, también discurren por encima de la traza de la vía pero que, conceptualmente, se distinguen de aquéllos porque la superficie por la que discurre la fauna está, en un caso, a nivel del paisaje (ecoductos) y en el otro sobreelevada respecto al mismo.

Se ha hecho referencia, en anterior apartado, a varios indicadores los cuales, actualmente, son fundamentales para la medición o evaluación del grado de fragmentación de hábitats. Así, para medir el estado de fragmentación de un

área determinada, es posible emplear el concepto de tamaño efectivo de malla, *effective mesh size* en inglés (Jaeger A.G. 2000). Cuanto más pequeño es este valor, mayor es el grado de fragmentación del área (van der Reer et al, 2015).

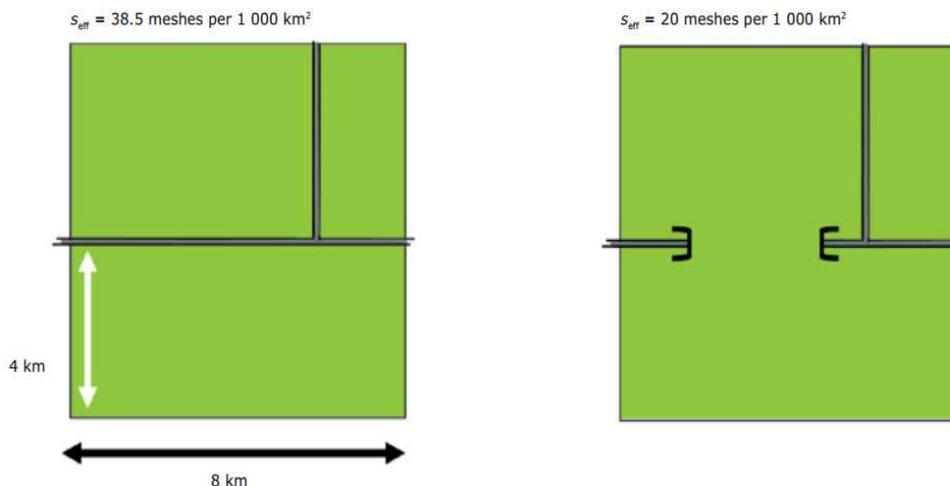


Figura 16. Efecto de la existencia de un túnel en la densidad de red efectiva

(EEA/FOEN, 2011)

Pero igualmente es posible emplear otro indicador como es la densidad efectiva de malla, también definido antes. Este indicador permite la aportación de información muy interesante al caso ahora estudiado, esto es, a la efectividad de la aplicación de una medida correctora como es la ejecución de un falso túnel (*landscape tunnel* o ecoducto) en el caso en que se tengan grandes desmontes fracturando el territorio en un área considerada. Como así se muestra en la figura 16, la densidad efectiva de malla es menor si se ejecuta el túnel que si se mantiene la fragmentación provocada por la vía (EEA/FOEN, 2011), disminuyéndola casi a la mitad (para el caso en la figura 16 representado).

El que este valor disminuya, y aún más en la medida en que se comenta, es fundamental porque de él depende la probabilidad de persistencia de las especies que habitan un área fragmentada, de acuerdo con lo que se muestra en la figura 17. Es decir, lo que se tiene es que, si bien dependiendo de las variables que se consideren, lo cierto es que existe un punto de no retorno para

la fragmentación del territorio, la cual puede darse en grado tal que, a partir del mismo, no sea posible la recuperación de las poblaciones de las especies afectadas. De ahí que estas medidas correctoras tengan un alcance tan importante en el mantenimiento de la biodiversidad de un territorio afectado por esta problemática.

En este sentido, la ejecución de falsos túneles en zonas de grandes desmontes, con una importante conectividad ecológica potencial, tiene unas ventajas

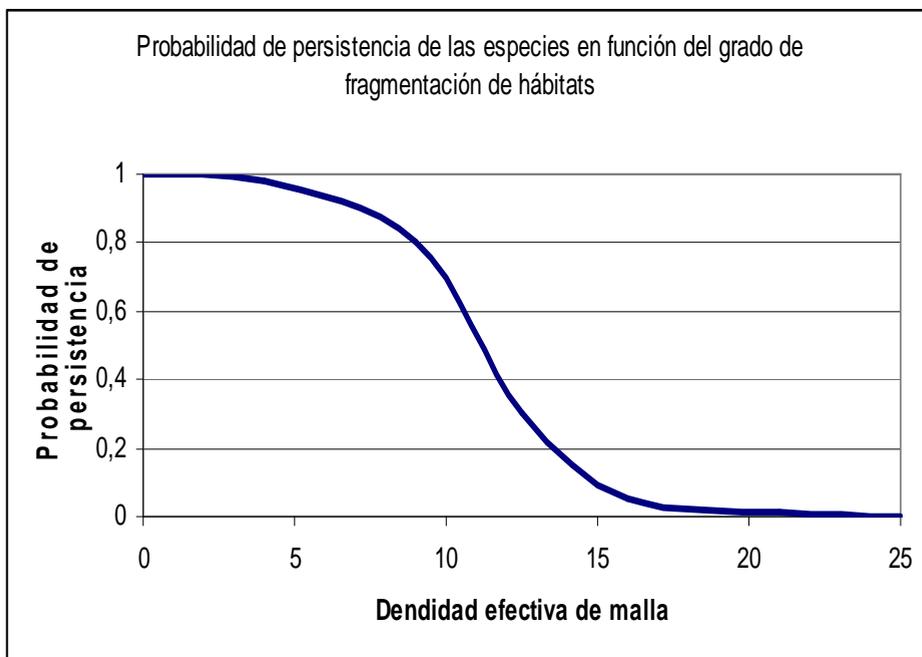


Figura 17. Probabilidad de persistencia de especies en función de la densidad efectiva de malla (elaboración propia a partir de van der Reer et al, 2015).

ambientales muy determinantes que, no obstante, han de sopesarse frente a un conjunto mucho más amplio de criterios de selección, como así se recoge en la presente tesis.

### **2.2.2.6 Consideraciones respecto a la ubicación de pasos exclusivos para fauna**

El emplazamiento de los pasos específicos para la fauna, ya sean superiores o inferiores, es un aspecto fundamental si quiere garantizarse su efectividad, y especialmente los superiores vista la inversión económica que asimismo suponen. Como ya se comenta en la introducción de la presente tesis, este trabajo parte de la premisa de que, a escala regional, ya se han determinado aquellos grandes desmontes que han de ser objeto de restauración, siendo el problema ahora estudiado de carácter más local.

La ubicación de los pasos de fauna en áreas que, desde una perspectiva espacial amplia, sean las más adecuadas para una futura utilización por los animales, enlaza directamente con la idea y necesidad de establecer corredores regionales de fauna, definidos como las áreas de máxima probabilidad de uso por un conjunto de taxones para sus desplazamientos por el territorio, teniendo en consideración la existencia de áreas núcleo o de máximo interés de conservación (p.e., sitios o hábitats Red Natura 2000) que alojan las poblaciones a conectar (Valladares et al, 2011).

En esencia, y para el caso europeo, se trata de ubicar los pasos específicos en los puntos de conexión que la Infraestructura Verde. La vocación de la presente tesis es aportar nueva información para la mejor restauración de esos puntos de conexión quebrados por desmontes de entidad.

### **2.2.3 Corrección de impactos en favor de la integración paisajística y visual**

Seguidamente se pasa a hacer una descripción de las medidas de integración que, para el caso de desmontes de carretera ya existentes, es posible establecer actualmente.

#### **2.2.3.1 Pantallas arbóreas**

Una vez estudiada la cuenca visual de los desmontes, y conocidos aquellos puntos de observación con mayor número de observadores potenciales, puede

procederse a ejecutar una pantalla arbórea, compuesta por especies de alto porte, que impidan la visión de los mismos desde los puntos indicados. El objetivo de la medida no es corregir el paisaje en sí mismo, sino la ocultación de la vista del desmonte desde puntos de observación sensibles.

### **2.2.3.2 Moldeado del terreno**

Suavizar los taludes en la medida de lo posible, eliminando aristas y superficies planas, aumenta la naturalidad de los mismos y su integración. El redondeado en coronación de las aristas es una medida muy deseable, siempre que no suponga un daño crítico a algún recurso ambiental localizado en esa zona. Si el daño no es crítico, en el sentido de que la afección puede regenerarse posteriormente sobre el perfil del terreno ya suavizado, la medida es deseable.

### **2.2.3.3 Envejecimiento de rocas**

En el caso de taludes de desmonte practicados en roca, la diferencia cromática entre el corte y la roca expuesta del entorno suele ser muy evidente. Si ha pasado el tiempo suficiente, los taludes existentes podrán haber evolucionado hasta alcanzar un tono similar al de la zona en que se insertan. Si no fuese así, cabe la posibilidad de tratarlos mediante distintos métodos (proyección de agua y óxidos de manganeso y hierro, tintes vegetales...).

# **CAPÍTULO 3    METODOLOGÍA**



En los modelos para la selección de alternativas, se distinguen dos fases muy marcadas (Gómez Orea, 2002):

1. Formalización de una matriz de datos criterios/alternativas para la evaluación de estas últimas.
2. Aplicación de un método de tratamiento de dicha matriz y decisión en función de los resultados.

Los métodos para el tratamiento de la matriz referida son muchos, todos ellos englobados dentro de los métodos de Toma de Decisiones Multi-Criterio, más extendido en inglés como Multiple Criteria Decision Making methods (MCDM). Dentro de la diversidad existente de tales métodos, es posible clasificarlos como sigue (Méndez, 2008):

- Métodos de agregación total: Estos métodos se caracterizan por agregar los diferentes puntos de vista o criterios (eventuales pesos les pueden ser atribuidos) en una única función la cual debe ser posteriormente maximizada o minimizada.
- Métodos de agregación parcial: este grupo de métodos se distingue del anterior porque, ante la comparación dos a dos de las alternativas que puedan hallarse en liza, ocurre que la comparación  $A_i$  frente a  $A_j$  no es igual a la comparación  $A_j$  frente a  $A_i$ .

La metodología empleada para el tratamiento matemático de la información que en este caso se ha manejado, se ha apoyado en un método híbrido construido a partir de tres métodos relacionados con los procesos de decisión (Martin-Utrillas et al, 2015a), como son:

- Método de expertos empleado:
  - o método Delphi
- Métodos multicriterio de Toma de Decisiones:

- método AHP
- método VIKOR

El primero de ellos, esto es el método Delphi, se ha empleado en la primera fase de desarrollo del análisis efectuado. Es así que el mismo se ha empleado para obtener la información base que, posteriormente y en base a los restantes métodos multicriterio, se ha tratado adecuadamente al fin requerido. Por tanto, en base a una serie de cuestionarios, ha sido posible recabar la opinión de un panel de expertos en torno a la definición de criterios y alternativas, así como a la preferencia que muestran en relación con todos ellos.

El método AHP ha permitido, fijados los criterios y alternativas sobre los que trabajar, así como las preferencias mostradas por los expertos, obtener, de un lado, la priorización y, especialmente, los pesos de los criterios que entran en juego en el problema de decisión tratado. Y, de otro, para obtener la matriz de decisión de las alternativas.

Por último, el método VIKOR ha supuesto el poder encontrar, a partir de la matriz de decisión calculada mediante la metodología AHP, y combinándola con el vector de prioridades de los criterios (también hallado a partir de la aplicación del AHP), la solución de consenso entre todos los expertos.

Seguidamente se entra a describir las metodologías matemáticas ahora referidas para, posteriormente, aplicarse al caso de la restauración de grandes taludes de carretera.

### **3.1 Método Delphi.**

El método Delphi fue desarrollado a finales de los años cuarenta en Estados Unidos, por la RAND Corporation, pero no fue hasta la década de los sesenta que se formalizó como tal método (Olaf, 1967; Dalkey, 1969). Se perseguía con ello poder obtener información cuantificada de un grupo de expertos para un problema complejo para el que no existiese, y fuese difícil o imposible, obtener información mediante métodos analíticos.

Algunos autores sitúan el método Delphi dentro del método para la elaboración de escenarios (Cely, 1999), el cual, asimismo, es un método de uso habitual dentro de la Prospectiva Estratégica (Godet, 2007). Es decir, puede tenderse a pensar que se trata de un método auxiliar que sirve de apoyo a la elaboración de escenarios en estudios propios del análisis prospectivo. Y, si bien esto es así y, en todo caso, valoriza el método en cuestión, lo cierto es que se trata de una metodología con cuerpo propio y entidad reconocida.

Es por ello por lo que, el método como tal, ha de encuadrarse dentro del grupo de lo que se denomina métodos de expertos (dado que se basa en la consulta a expertos en materias que estén relacionadas con un problema objeto de análisis), los cuales presentan dos ventajas fundamentales (Arce, 2003), como son que:

- la información obtenida del grupo de expertos siempre será mejor que la venida del mejor de los expertos que componen el panel, lo que se dice en base a que "varias cabezas siempre son mejor que una".
- El número de factores que es tenido en cuenta por un grupo es siempre mayor que considerado por una única persona.

El método permite confrontar las opiniones de los expertos, tanto para los criterios como para las alternativas, mediante el empleo de cuestionarios anónimos (Zolfani et al, 2013). De este modo, permite que, si así es considerado oportuno, cada experto participante pueda aportar propuestas de alternativas, así como de nuevos criterios o sub-criterios. Tras ello, sus propuestas son devueltas al grupo de expertos para su reconsideración.

Con este feedback de carácter anónimo, expertos con puntos de vista diferentes facilitan la comprensión de las cuestiones en discusión, permitiendo alcanzarse un acuerdo general entre todos ellos. Asimismo, y gracias a esta metodología, es también posible identificar las alternativas y los criterios menos significativos, lo que lleva, finalmente, a su eliminación del análisis.

El método se ha empleado en muchísimas ocasiones y para fines diversos, siempre dentro del que es su objetivo principal, antes comentado. Así, se ha usado para la asignación de pesos, para el establecimiento de criterios de valoración de factores ambientales o impactos y, también, para la toma de decisiones (Arce, R., 2003).

Seguidamente se entra en la descripción del método.

### **3.1.1 Elementos del método Delphi**

Los elementos que componen el método (Arce, 2003) son los que se señalan seguidamente:

**Panel:** es el conjunto de expertos que toma parte en el análisis Delphi. El panel en cuestión debe estar formado por un mínimo de siete expertos y un máximo de treinta, por encima de lo cual la aportación de más expertos no representa avances en los resultados (Dalkey et al, 1970).

**Moderador:** es la persona responsable de preparar los cuestionarios y recoger las respuestas.

**Cuestionario:** es el documento que se envía a los expertos. No es sólo un documento que contiene una lista de preguntas, sino que es el documento que consigue que los expertos interactúen, ya que en el mismo se presentarán los resultados de anteriores circulaciones.

**Circulación:** es cada uno de los sucesivos cuestionarios que se presentan al grupo de expertos.

### **3.1.2 Etapas de aplicación del método Delphi**

El método en cuestión propone una serie de fases a seguir las cuales, sin embargo y por el carácter abierto que presentan, presentan cierta flexibilidad. Es así que, según se consulte a unos autores u otros, podrán encontrarse variaciones más o menos significativas, si bien el tronco común que seguirá la sistemática llevada a cabo será el mostrado en la figura 18.

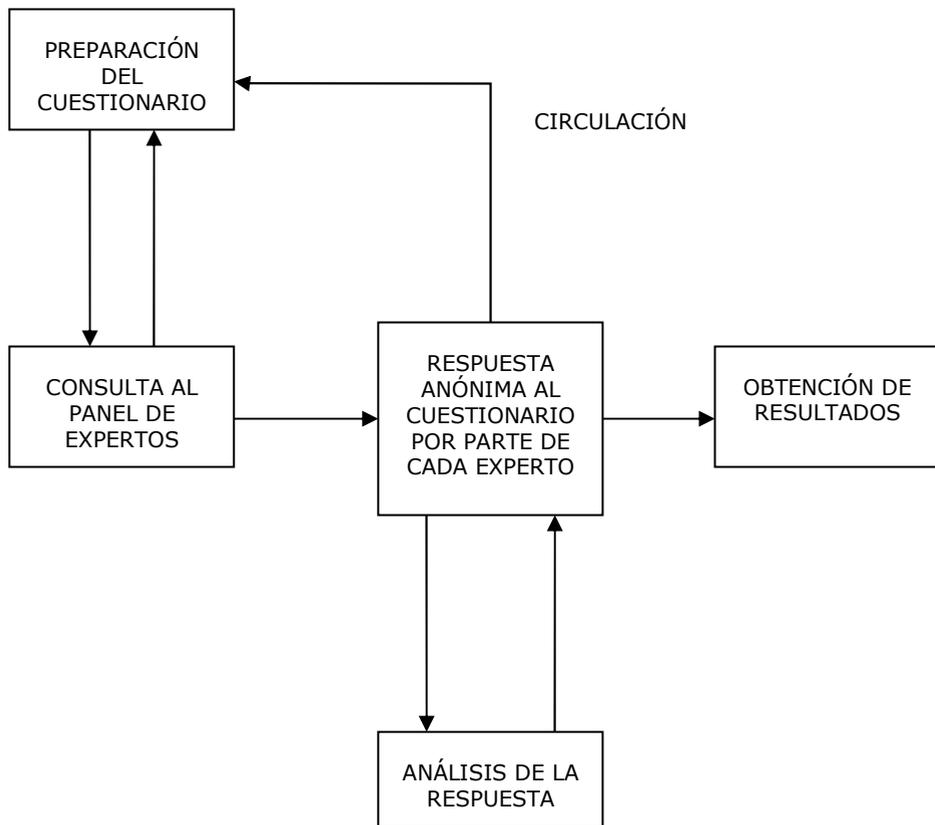


Figura 18. Diagrama de la consulta Delphi

De acuerdo con Arce (2003) el método está compuesto por una serie de fases o circulaciones como son:

1. Se presenta un cuestionario a los expertos el cual está abierto a sus sugerencias en la propia configuración del mismo, pudiéndose variar criterios o cualesquiera otros elementos aparecidos en él.
2. Sobre las variaciones que puedan haber surgido durante la primera circulación, se prepara el segundo cuestionario que, es nuevamente presentado al panel de expertos. Una vez contestados, son devueltos al

moderador, que realiza un análisis de la información recibida, de forma que pueden obtenerse la mediana y los cuartiles inferior y superior.

3. De nuevo se le pasa al panel el cuestionario pero, esta vez, acompañado de los estadísticos, al objeto de que los expertos puedan, en base a esa información adicional, reconsiderar sus respuestas. En caso de que los mismos mantengan sus posiciones dentro de los cuartiles extremos, deben argumentar la defensa de las mismas.
4. En esta ocasión se le pasa al grupo de expertos el cuestionario junto con las argumentaciones de los aspectos más extremos dadas por sus defensores. En este caso, esos argumentos son objeto de debate anónimo. Esto se repetiría hasta que hubiese convergencia en las respuestas o bien se concluyese que no existe la misma, caso este en el que habría que replantearse la configuración del panel, el enfoque del problema u otras cuestiones de partida.

En realidad, lo habitual es que, con la segunda circulación, pueda darse por finalizada la aplicación del método, dado que no es corriente que se den posturas muy extremas.

## **3.2 Método AHP**

El conocido como método AHP, acrónimo de su denominación en inglés Analytic Hierarchy Process, es un método de decisión multicriterio que fue desarrollado inicialmente por el matemático de origen iraquí Thomas Saaty. Queda englobado dentro de los métodos de agregación total (Méndez, 2008).

Seguidamente se abunda sobre los fundamentos y etapas que sostienen y constituyen este método multicriterio.

### **3.2.1 Etapas de aplicación del método AHP**

Esta metodología matemática permite desmembrar un problema de decisión complejo según una estructura jerárquica, permitiendo evidenciar las relaciones existentes entre el objetivo global, los criterios de selección y las alternativas

que es posible implementar (Saaty, 2012). Una vez conseguida esa desagregación del problema, la forma de proceder es la que se indica a continuación y que, en posteriores apartados, se explica con más detalle:

1. El primer paso consiste, de un lado, en la definición de la problemática a tratar y, de otro, del objetivo global que se persigue.
2. Establecimiento de una estructura jerárquica en la que queden reflejados, y dispuestos en su nivel correspondiente, el objetivo global, los criterios a manejar para la selección de alternativas y las propias alternativas o soluciones que podrán llevar a la consecución del referido objetivo.
3. Obtención de la información (juicios) sobre la que se aplicarán las fases posteriores del método, lo que se hará en base a la escala de Saaty en tanto la misma se ha diseñado para el mejor tratamiento de los datos recabados.
4. Estudio de la consistencia de los juicios.
5. Elaboración de la matriz de comparación por pares para los criterios. Si es el caso, se empleará algún método de agregación que permita el tratamiento del conjunto de los juicios obtenidos, lo que podrá hacerse en función de las características del problema.
6. Obtención del vector de prioridades para los criterios, a partir del tratamiento de la matriz de comparación por pares mediante la metodología del valor propio (eigenvalue method).
7. Obtención de las matrices de comparación por pares para las alternativas, y ello realizado para cada criterio manejado. Medición de las consistencias.
8. Obtención, a partir de lo anterior, de la matriz de decisión. Esta matriz será rectangular y tendrá tantas filas como alternativas, y tantas columnas como criterios.

9. Composición de la matriz de decisión con el vector de prioridades de los criterios, al objeto de obtener una matriz de orden  $k \times 1$  la cual refleje, para cada alternativa  $k$ , su prioridad global y consecuente posición en la jerarquía finalmente obtenida para las mismas.

A continuación, se entra a describir con mayor profundidad el armazón matemático que sostiene el método AHP descrito.

### **3.2.2 Bases matemáticas del método**

El método se apoya en tres principios básicos, como son:

- Descomposición: El principio de descomposición supone la separación del problema de decisión, complejo y amalgamado, en un modelo de jerarquía que, como se ha comentado antes, facilita la interpretación de los elementos que componen el problema, al tiempo que pone de manifiesto de forma mucho más clara las relaciones entre tales elementos.
- Juicios comparativos: este principio permite la construcción de las matrices de comparación dos a dos entre todos los criterios que participan en el problema de decisión. De ello es posible iniciar a obtener prioridades entre los elementos comparados, si bien aún con carácter no global.
- Composición jerárquica: este principio permite encontrar prioridades de carácter global a partir de las anteriormente halladas, de forma que, encontradas tales prioridades globales, es posible actuar sobre el último nivel del problema, el de las alternativas, para proceder a la jerarquización de las mismas.

La metodología AHP, en tanto método multicriterio, parte de cuatro axiomas fundamentales (Saaty, 1986), los cuales cabe señalar a continuación:

1. Axioma de la Reciprocidad: si un juicio comparativo entre dos elementos A y B, con respecto a un tercer elemento C, es denominado  $P_c(A,B)$ , entonces se tiene que:

$$P_c(B, A) = \frac{1}{P_c(A, B)} \quad (1)$$

2. Axioma de homogeneidad: los elementos del problema, en cada nivel de jerarquía, no deben diferir mucho entre sí, es decir, ha de mantenerse un orden de magnitud, dado que, de lo contrario, podrán generarse errores en los juicios fácilmente.
3. Axioma de Síntesis: este axioma expresa que la importancia de los elementos en niveles superiores no debe depender de las prioridades o pesos de los factores de niveles más bajos.
4. Axioma de expectación: las prioridades finalmente obtenidas no pueden ser radicalmente diferentes a ningún conocimiento o expectativa que los evaluadores puedan tener.

Una vez señaladas las bases matemáticas que sostienen el método AHP, se pasa a la descripción del mismo en función de las que son sus etapas de aplicación.

### **3.2.3 Juicios: escala de medición**

El método AHP se nutre de las comparaciones dos a dos de los elementos constitutivos del problema, esto es, criterios entre sí y alternativas entre sí, estas últimas bajo la premisa de compararlas para cada criterio independientemente. De ello se obtienen las matrices de comparación por pares que permiten la priorización de los elementos que las componen.

Pero, para poder establecer la comparación entre los elementos que constituyen el problema en estudio (criterios y alternativas), es necesaria la realización de juicios en base a una escala adecuada, equilibrada y correcta que permita la obtención de información fiable y consistente (en el sentido de Saaty, esto es, juicios sobre la comparación entre elementos coherentes para un mismo

evaluador). Es así que la escala que tradicionalmente se emplea para la aplicación de la metodología que ahora es objeto de descripción es la que se muestra en la tabla 01.

Intensidad de la Importancia	Definición	Explicación
1	Misma Importancia	Las dos actividades contribuyen igualmente al objetivo
3	Algo más importante	La experiencia y los juicios favorecen ligeramente una actividad sobre otra
5	Bastante más importante	La experiencia y los juicios favorecen fuertemente una actividad sobre otra
7	Mucho más importante	Una actividad es favorecida mucho más sobre la otra. Su dominio queda demostrado por la práctica
9	Absolutamente más importante	La evidencia favorece una actividad sobre la otra de forma de la forma más clara posible.
2,4,6,8	Valores intermedios	Se emplean cuando es necesario un compromiso o consenso.
Recíproco de los valores escritos arriba		Si la actividad i tiene asignado uno de los valores anteriores (distinto de cero) cuando es comparado con la actividad j, entonces j tiene el valor recíproco cuando es comparado con i.

Tabla 1. Escala de T. Saaty (Saaty, 2012)

Esta misma escala, pero expresada en otros términos, puede encontrarse en diferentes ocasiones o rescrita por diferentes autores, si bien su estructura numérica se mantiene, como, por ejemplo, así se recoge en la tabla 02.

Escala	Calificación numérica	Recíproco
Extremadamente preferido	9	1/9
De muy fuerte a extremadamente	8	1/8
Muy fuertemente preferido	7	1/7
De fuertemente a muy fuertemente	6	1/6
Fuertemente preferido	5	1/5
De moderadamente a fuertemente	4	1/4
Moderadamente preferido	3	1/3
De igualmente a moderadamente	2	1/2
Igualmente preferido	1	1

Tabla 2. Escala de Saaty de acuerdo con Vargas (Vargas, 2010).

El empleo de esta escala supone el poder traducir a número aquellas variables cualitativas, de corte subjetivo, las cuales, por ser esta su naturaleza, presentan un difícil tratamiento en el seno de los problemas de decisión. Es por ello que la propia escala puede reformarse en base a variables lingüísticas, si el caso lo requiere, a fin de facilitar las comparaciones por parte del evaluador, siempre que tales variables lingüísticas estén en correspondencia biunívoca con los valores expresados en las tablas anteriores.

Asimismo, en el uso de la escala de Saaty como herramienta para realizar juicios comparativos, ha de indicarse que suelen emplearse sus términos impares, a fin de que la mayor diferencia entre las opciones en liza favorezca su mejor comparación lo que, finalmente, redundará en una mejor consistencia de las respuestas de los expertos que realizan la comparación. Así pues, los términos pares tienen, en la práctica, carácter auxiliar pues quedan, si es el caso y de acuerdo con Saaty, (Saaty, 1980), para encontrar el consenso entre los componentes del panel de expertos cuando pudiera ocurrir que se diesen posturas muy aproximadas.

### 3.2.4 Estructura jerárquica

Como se ha comentado anteriormente, una de las etapas fundamentales del método es aquella en la que se procede a descomponer el problema de decisión, complejo, en sus componentes. Esto lo hace, el método AHP, en base a tres niveles principales de jerarquía, como son:

- Objetivo global: se trata del establecimiento de la prioridad global a conseguir.
- Criterios (objetivos): son los elementos que participan en la decisión, decantando las consideraciones en un sentido o en otro en función de su relevancia en el conjunto.
- Alternativas: estas son las opciones o soluciones con que se cuenta para alcanzar el objetivo global.

La figura 19 muestra la estructura jerárquica ahora comentada, la cual adopta la típica forma de árbol tan característica de los problemas acometidos por esta metodología.

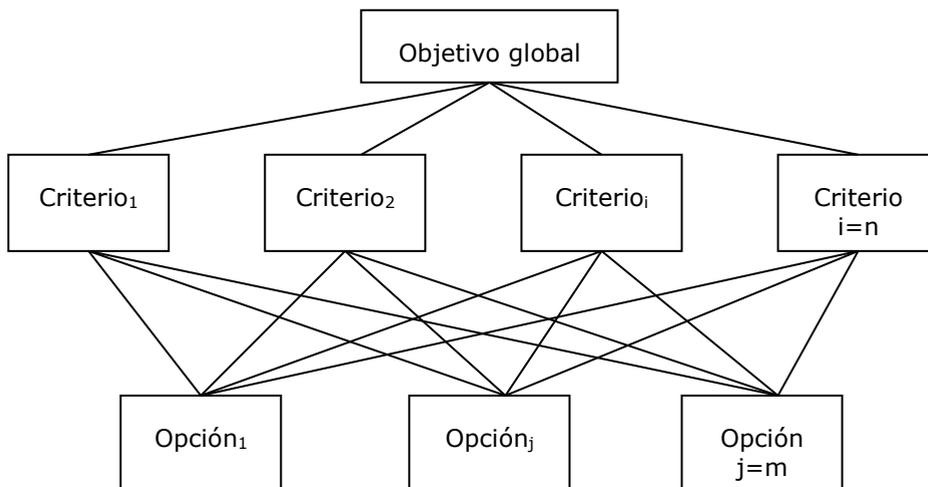


Figura 19. Ejemplo de estructura de Jerarquías.

Como se observa, la estructura sólo permite que existan relaciones entre los distintos niveles de la misma, esto es, en vertical, y no en horizontal. Esto supone que, dentro de un mismo escalón, los elementos que se encuentran en el mismo sean totalmente independientes los unos de los otros.

### **3.2.5 Agregación de juicios individuales**

Cuando, como es el caso que nos ocupa, el método AHP se emplea sobre un panel de expertos, se hace necesario tratar la información por ellos aportada de forma agregada, a fin de poder llevar a cabo la aplicación de la referida metodología (Martin-Utrillas et al, 2015c). Para ello deben satisfacerse tres condiciones, como son:

- Principio de Pareto: este principio señala que si se tienen dos elementos A y B a comparar, y la mayoría de los expertos, de forma individual, muestra preferencia por A sobre B, entonces el grupo en conjunto debe preferir A sobre B.
- Condición de homogeneidad: si de manera individual se tiene un juicio comparativo entre dos elementos que expresa una preferencia t veces mayor de A sobre B, entonces el grupo deberá preferir t veces A sobre B.
- Requisito de Reciprocidad: El valor agregado de los recíprocos de los juicios individuales debe ser el inverso de los valores agregados de los juicios originales. Esto se ve más claro expresado matemáticamente de la forma que sigue:

$$f\left(\frac{1}{x_1}, \frac{1}{x_2}, \dots, \frac{1}{x_n}\right) = \frac{1}{f(x_1, x_2, \dots, x_n)} \quad (2)$$

Siendo  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  el conjunto de juicios individuales emitidos por los expertos para una comparación entre dos elementos A y B, y f la función de agregación de juicios.

El método de agregación de juicios individuales, AIJ, emplea la media geométrica ponderada al objeto de obtener una matriz de juicio global derivada del conjunto de los juicios particulares obtenidos. En el caso presente, la ponderación que se ha hecho de los distintos expertos que han participado no ha sufrido sesgo alguno, esto es, todos han sido valorados de acuerdo con un mismo grado de experiencia y conocimiento. De ahí que se haya empleado la media geométrica como tal.

Para poder hacer esto, es decir, entender todos los juicios de los expertos agregados como un único conjunto de respuestas a través del empleo de alguna herramienta matemática (en nuestro caso la media geométrica ponderada), han de satisfacerse las condiciones antes expuestas, como así es.

Sin embargo, la de reciprocidad no ha estado exenta de cierta discusión que, no obstante, se ha cerrado concluyendo que el método AIJ sí cumple tal condición, por lo que es posible tratar la información obtenida como venida de un único individuo (Forman y Peniwati, 1998).

Una vez legitimado el método AIJ para proceder a la agregación de juicios, la forma de proceder para encontrar la matriz de juicios colectiva,  $A=(a_{ij})_{n \times n}$ , donde  $a_{ij}$  se obtiene de la expresión que se apunta seguidamente:

$$a_{ij} = \left[ \prod_{k=1}^m (a_{ij}^{(k)}) \right]^{1/m} \quad (3)$$

donde  $a_{ij}^{(k)}$  son los elementos de la matriz que recoge los juicios de todos los expertos, y  $m$  el número expertos consultados.

### **3.2.6 Comparación por pares de los criterios**

Si tenemos un conjunto de  $C_i$  criterios conformado por  $n$  elementos, los juicios emitidos para cada comparación dos a dos practicada quedan recogidos en la matriz  $A$ , la cual se construye como sigue:

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} C1 & C2 & C3 & Ci & Cn \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} = 1/a_{12} & 1 & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ a_{31} = 1/a_{13} & a_{32} = 1/a_{23} & 1 & \dots & a_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & 1 & \dots \\ a_{n1} = 1/a_{1n} & a_{n2} = 1/a_{2n} & a_{n3} = 1/a_{3n} & \dots & 1 \end{matrix} & \begin{matrix} C1 \\ C2 \\ C3 \\ Ci \\ Cn \end{matrix} \end{matrix} \quad (4)$$

Como se observa, lo que se tiene es una matriz cuadrada cuya diagonal está formada por términos unitarios, dado que en la comparación que se hace entre criterios, la preferencia de un criterio frente a sí mismo, de acuerdo con Saaty y la escala por éste aportada, implica la asignación de un juicio unitario.

### 3.2.7 Método del valor propio

Una vez se tiene la matriz de comparación por pares, ha de buscarse la jerarquización de los criterios en base a un método de priorización que, en el caso de AHP, suele ser el método del valor propio. Así, el vector de prioridades buscado ( $\omega$ ) es el vector propio que corresponde al mayor autovalor ( $\lambda_{max}$ ) de A de acuerdo con Saaty (1980).

Un ejemplo de esto mismo, es decir encontrar la priorización de un conjunto de elementos a través de la búsqueda de autovalores y autovectores de la matriz de un sistema algebraico de ecuaciones, es el algoritmo PageRank del buscador Google, el cual jerarquiza las páginas web en función de su relevancia (Ibáñez, 2011).

Para encontrar el referido vector propio, ha de resolverse el sistema de ecuaciones lineales siguiente:

$$A \cdot \omega = \lambda \cdot \omega \quad (5)$$

La resolución del mismo se realiza mediante la búsqueda de aquellos valores que anulan el polinomio característico de A, esto es, los valores propios (Golub y

van Loan, 1996). Por tanto, tales valores son la solución de la ecuación característica de la matriz A, la cual se expresa como sigue:

$$\det(A - \lambda \cdot I) = 0 \quad (6)$$

Como es sabido, esto se exige a fin de que el sistema ecuaciones lineales sea compatible.

La resolución de este sistema y, por tanto, la obtención de los autovalores y, del mayor de ellos, su correspondiente vector propio, podrá hacerse en base a los distintos métodos matemáticos que existen a tal fin.

### 3.2.8 Consistencia

Una de las grandes ventajas del método AHP es que el grado de inconsistencia, por parte de los expertos, en el proceso de evaluación puede ser medido. En ocasiones ocurre que los expertos no consiguen expresar preferencias consistentes en casos en los que el número de criterios comienza a ser elevado.

A fin de acometer esta cuestión, el método de Saaty permite, frente a muchos otros que no albergan tal ventaja, medir la inconsistencia en la matriz de comparación de pares, para lo cual el método da un umbral de consistencia que garantiza que, mientras no se supere, las respuestas dadas son coherentes las unas con las otras.

n	3	4	≥ 5
CR	5%	9%	10%

Tabla 3. Valor máximo de CR admisible (Saaty, 2012)

El ratio de consistencia (CR) es el principal indicador con el que poder medir el grado de consistencia. El CR se calcula a partir de la expresión que sigue:

$$CR = \frac{CI}{RCI} \quad (7)$$

siendo (CI) el índice de consistencia y el (RCI) índice de consistencia aleatorio.

El primero de ellos, esto es, el índice de consistencia (CI), se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (8)$$

Siendo n el orden de la matriz y  $\lambda_{\max}$  el mayor autovalor obtenido de la misma.

El valor del índice de consistencia aleatorio (RCI) es fijo, depende del orden de la matriz y es posible obtenerlo a partir de la tabla 04 (Saaty, 2012). En caso contrario, los juicios deben ser revisados.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RCI	0	0	0.52	0.89	1.11	1.25	1.35	1.40	1.45	1.49

Tabla 4. Índice de consistencia aleatorio (RCI).

### 3.2.9 Comparación por pares de las alternativas

Una vez se ha obtenido el vector de prioridades  $\omega$  de la matriz de comparación por pares de los criterios, se procede igualmente para el caso de las alternativas. En este caso, el panel de expertos habrá señalado sus preferencias sobre las alternativas que se hubieren planteado, comparadas dos a dos. Pero esto se habrá hecho para todos y cada uno de los criterios en liza, de forma que el ejercicio comentado de comparación por pares de las alternativas, se hará tantas veces como criterios se tengan.

De todo ello se tendrá, en última instancia, un conjunto de vectores de prioridades cada uno de los cuales estará, a su vez, conformado por tantos elementos como alternativas se tengan. Asimismo, el número de vectores de prioridades para las alternativas será el mismo que el de los criterios que se tengan ya que, como se ha indicado, se habrá obtenido uno para cada criterio.

El conjunto de todos los vectores de prioridades obtenido se ordenará según una matriz, denominada matriz de decisión, que tendrá tantas filas como alternativas y tantas columnas como criterios.

Por último, componiendo la matriz de decisión ahora referida (cada uno de cuyos elementos expresa la preferencia de una alternativa respecto a las restantes, para un criterio dado) y de orden  $k \times l$ , con el vector de prioridades de los criterios (que expresa el peso relativo de cada uno de ellos) de orden  $l \times 1$ , se obtiene una matriz resultante, de orden  $k \times 1$  que recoge las prioridades globales para las alternativas, lo que permite su jerarquización, como así se deseaba.

### 3.3 Método VIKOR

La metodología VIKOR, del original en serbio: *VISeKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resende* (Optimización Multicriterio y Solución de Compromiso) es una técnica de decisión multi-criterio que parte de una premisa distinta a la habitual, pues busca como opción más idónea aquélla que representa una solución de compromiso entre las alternativas consideradas. Esto lo hace procediendo a la jerarquización de todas las referidas alternativas mediante la medición de la proximidad o cercanía de cada una de ellas con respecto a la alternativa más adecuada (Duckstein y Opricovic, 1980, Curiel-Esparza et al 2012, 2014; Martín-Utrillas et al, 2014 (a)).

Esta técnica se encuentra actualmente muy reconocida por su validez en problemas de decisión que manejan elementos subjetivos no conmensurables (Opricovic y Tzeng, 2004) se apoya en una matriz de decisión que, como así ha sido en el caso presente, puede ser la obtenida mediante la aplicación del método AHP, de forma que se parte de una matriz rectangular de orden  $(i \times j)$  donde  $i$  son los sub-criterios manejados y  $j$  las alternativas propuestas.

De acuerdo con Sayadi et al (2009), el método de VIKOR se desarrolla a partir de una  $L_p$ -métrica la cual se comporta como una función de agregación y que, asimismo, tiene la forma que se indica a continuación:

$$L_{pj} = \left\{ \sum_{i=1}^n \left[ \frac{(f_i^* - f_{ij})}{(f_i^* - f_i^-)} \right]^p \right\}^{1/p} \quad (9)$$

Siendo  $i=1, 2, \dots, n$  criterios,  $j=1, 2, \dots, m$  alternativas  $m$  y  $p \in [1, \infty]$ .

Una métrica, en el sentido matemático en que se emplean en los métodos MCDM, no tiene por qué fundamentarse en una norma (Valdivia, 1985).

Sin embargo, VIKOR sí se apoya en Espacios de Lebesgue, o  $L_p$ -espacios, los cuales definen sus distancias en base a  $L_p$ -métricas. De esa forma, encuentra las distancias que posteriormente emplea en los cálculos entre alternativas.

Es decir, si en un espacio vectorial  $n$ -dimensional, para medir la distancia entre dos vectores, suele utilizarse la métrica euclidiana, lo que equivale a utilizar  $p=2$ , sea  $\mathfrak{R}^2$  o  $\mathfrak{R}^3$ , en el presente método, se hace uso de dos opciones de métrica concretas para calcular la distancia entre alternativas.

En concreto, se usan dos  $L_p$ -métricas, como son:

- Distancia de Minkowski: la distancia entre dos vectores  $p$  y  $q$  en un espacio vectorial real  $n$ -dimensional con referencia cartesiana fija, se obtiene de la expresión

$$d_1(p, q) = \sum_1^h |p_i - q_i| \quad (10)$$

Donde  $p$  y  $q$  son vectores  $p = (p_1, p_2, \dots, p_h)$  y  $q = (q_1, q_2, \dots, q_h)$ . Esta distancia es la base sobre la que se realiza el posterior cálculo de  $S_j$ .

- Distancia de Chebyshev: la distancia entre dos vectores  $p$  y  $q$  de componentes  $p = (p_1, p_2, \dots, p_h)$  y  $q = (q_1, q_2, \dots, q_h)$  viene de la expresión siguiente

$$d_{Ch}(p, q) = \max_i (|p_i - q_i|) \quad (11)$$

Esta métrica es la base sobre la que se realiza el posterior cálculo de  $R_j$ .

Así pues, este método establece la siguiente sucesión de cálculos sobre la matriz de decisión  $D = [x_{ij}]$ :

1.- Para cada sub-factor, se determinan los valores  $f_j$  mejor y peor, denotando al mejor como  $f_i^*$  y al peor como  $f_i^-$ .

$$f_i^* = \max_j \{x_{ij}\} \quad (9)$$

$$f_i^- = \min_j \{x_{ij}\} \quad (10)$$

Obtenemos una nueva matriz de forma que, cada uno de los términos que la componen, viene de la aplicación de la expresión que sigue:

$$s_{ij} = w_i \frac{(f_i^* - x_{ij})}{(f_i^* - f_i^-)} \quad (11)$$

donde  $w_i$  es el vector de prioridades de los criterios, esto es, el peso global encontrado, para cada sub-factor, mediante la aplicación del método AHP. Empleamos la expresión anterior y, de ello, se determina  $S_j$ , lo que se hace para cada estrategia  $j$ , a partir de la expresión siguiente:

$$S_j = \sum_{i=1}^n w_i \frac{(f_i^* - x_{ij})}{(f_i^* - f_i^-)} = \sum_{i=1}^n s_{ij} \quad (12)$$

$S_j$  representa la medida de la utilidad que ofrece cada estrategia de restauración.

2.- A continuación, procediendo tal como establece la metodología que estamos aplicando, determinamos  $R_j$ , valor que, para cada estrategia analizada, mide el

nivel de desagrado o disgusto que genera la misma. Lo hacemos a partir de la expresión ahora aportada:

$$R_j = \max_i \left\{ w_i \left( \frac{f_i^* - x_{ij}}{f_i^* - f_i^-} \right) \right\} = \max_i (s_{ij}) \quad (13)$$

3.- Con todo, se opera de acuerdo con la expresión siguiente, obteniéndose los valores  $Q_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, j$ .

$$Q_j = \nu \frac{(S_j - S^*)}{(S^- - S^*)} + (1 - \nu) \frac{(R_j - R^*)}{(R^- - R^*)} \quad (14)$$

El significado de  $S^*$ ,  $S^-$ ,  $R^*$ , y  $R^-$  es el que se señala seguidamente:

$$\begin{aligned} S^* &= \min_j S_j \\ S^- &= \max_j S_j \\ R^* &= \min_j R_j \\ R^- &= \max_j R_j \end{aligned} \quad (15)$$

Asimismo,  $\nu$  es el peso para la estrategia de máxima utilidad para el grupo y  $1 - \nu$  es el peso del desagrado individual. Puesto que se busca una solución de compromiso, el valor de  $\nu$  suele ser 0.5.

4.- Por último, se tiene la jerarquización de las alternativas. De ella se obtiene la mejor estrategia de restauración de grandes desmontes existentes, en base al valor de  $Q$ , pues se trata de la solución de compromiso por consenso. Ahora bien, para poder afirmar esto mismo, deben satisfacerse las dos condiciones que establece el método VIKOR, las cuales son:

1. Condición de ventaja aceptable: se establece que, para que pueda considerarse una ventaja aceptable entre las dos estrategias de mayor prioridad, debe satisfacerse que

$$Q^{(2)} - Q^{(1)} \geq Q^{(j)} \quad (16)$$

donde  $Q^{(2)}$  es la estrategia de restauración en segunda posición en el ranking obtenido para  $Q$ ,  $Q^{(1)}$  es la primera de ellas y  $Q^{(j)} = 1/(j - 1)$ , donde  $J$  es el número de estrategias analizadas.

2. Condición de estabilidad aceptable: Esta condición exige que la estrategia mejor posicionada, es decir, la primera del ranking, sea también la mejor para los casos de  $S$  y  $R$ .

# **CAPÍTULO 4 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA**



## **4.1 Delphi. Formación de la estructura jerárquica**

### **4.1.1 Obtención de datos: Encuesta**

En primer lugar, para la obtención de datos y como se ha comentado en anterior apartado, se ha aplicado el método Delphi en base a la que es la metodología ya antes descrita para el mismo. Para ello, se ha recurrido a un conjunto de expertos diversificado, esto es, se ha pretendido aplicar tal metodología a un grupo de profesionales relacionado con distintas disciplinas científicas, si bien todas ellas involucradas en el tema que centra nuestro análisis, es decir, la restauración de grandes desmontes de carretera.

Es por lo anterior que se ha acudido a expertos que, bien participan en las etapas más iniciales del proceso de decisión (decision making process), ya sea desde la definición técnica de la solución o desde el análisis medioambiental de la misma, o bien lo hacen en otros campos de desarrollo de la solución, como es el de la consultoría o la ejecución en obra de las soluciones proyectadas. Con ello se ha pretendido obtener e incluir en el análisis los matices que cada una de tales etapas encierra, al objeto de que ese enriquecimiento ayude a encontrar una correcta ponderación de los criterios implicados, así como una más exacta valoración de las alternativas o estrategias de restauración consideradas.

Para ello se ha conformado un cuestionario dirigido al panel de expertos el cual se ha basado en la escala de Saaty, la cual ha sido ampliamente descrita en anterior apartado. Ello se ha hecho en base a la aplicación posterior del método AHP, dadas las ventajas evidentes que se derivan de aquélla y que también se han expuesto. Asimismo, el cuestionario incluía una descripción suficiente de los factores y estrategias de restauración propuesta, a fin de facilitar la comprensión y comparación de los mismos. Como se ha comentado, y en aplicación de la metodología de expertos Delphi, el cuestionario ha estado abierto a modificaciones las cuales no hubieran sido posibles de no haberse sido profuso en sus descripciones y explicaciones, si bien ha de decirse que las mismas se han visto complementadas por el trato directo con los expertos consultados, aún cuando únicamente a efectos aclaratorios.

#### **4.1.2 Definición de criterios**

Con todo, se ha considerado que los criterios, a los que en adelante nos referiremos frecuentemente como factores, que participan en la selección de alternativas de restauración de grandes desmontes de carreteras son los que se relacionan seguidamente:

- medio perceptual (PEE)
- medio físico (PHE)
- funcional (FUN)
- territorial (TEC)
- económico (ECO).

A su vez, estos factores principales se dividen en once sub-factores independientes, todos los cuales se han usado para el análisis. La perfecta conjunción de todos ellos, es decir, el encaje perfectamente ponderado de todos ellos, atendería al principio de sostenibilidad (Martin-Utrillas et al, 2015b). Es, en definitiva, éste uno de los objetivos fundamentales de la presente tesis, esto es, la búsqueda rigurosa, en base a una metodología estrictamente matemática, de los pesos que han de dárseles a cada uno de los criterios o factores que intervienen en la selección de alternativas de restauración de grandes desmontes en obras lineales.

Y es que las infraestructuras de transporte deberían asumir siempre el principio de sostenibilidad al que nos hemos referido, y pensarse y ejecutarse desde la observancia del mismo (Curiel-Esparza y Canto-Perelló, 2012). No podemos olvidar que las infraestructuras a las que nos referimos, como toda nuestra sociedad, quedan incluidas dentro de ecosistemas los cuales son la fuente única de los recursos de que disponemos para el desarrollo de toda actividad humana. Es por ello que siempre deberíamos atender al correcto diseño, protección y restauración de tales ecosistemas (Costanza, 2012). Y para que ello sea posible, es para lo que buscamos la ponderación adecuada de los factores

que intervienen en la decisión de nuestras acciones sobre ellos, si bien en esta ocasión, nos centramos en la restauración de taludes de desmonte de gran entidad, practicados especialmente en carreteras, ferrocarriles, etc., pero también en obras lineales en general.

Con todo, seguidamente se procede a realizar una descripción de los criterios a los que venimos refiriéndonos, a fin de conocer tanto su definición como sus componentes. Estas últimas son lo que hemos dado llamar, a efectos de nuestro análisis, como sub-factores.

- Medio Perceptual (PEE): está compuesto por todo cuanto puede ser percibido por los cinco sentidos humanos, en un contexto determinado. Se ha entendido que puede dividirse en dos sub-factores, los cuales se han tratado, a efectos del análisis realizado, desde el punto de vista de su perturbabilidad por parte de acciones humanas, esto es, del impacto que sobre ellos puede darse fruto de las actividades humanas. Se trata, pues, de los siguientes:
  - Impacto paisajístico (LA): la componente paisajística del medio perceptual incluye todos los elementos que participan en la construcción de un paisaje, desde masas arbóreas, de agua, caminos, hasta hitos de origen antrópico o desarrollos urbanos. Es susceptible de alteración por parte de infraestructuras como autovías, carreteras, etc, porque estas, que suponen un cambio en el ecosistema, perturban de forma especial las variables que conforman el paisaje (Liu et al, 2008).
  - Impacto visual (VI): la componente visual, al contrario que la paisajística, depende de la visibilidad que presenta un determinado paisaje, lo que supone que, asimismo, depende del número y tipo de potenciales observadores. Es así que se trata de una componente que debiera obligas a la perfecta coordinación del trazado de la infraestructura lineal con la estructura del paisaje (Hu et al, 2012). De esa manera, los observadores situados en la cuenca extrínseca de la

infraestructura, no verían alterada la percepción del paisaje que habitualmente pudieran venir teniendo.

- Medio Físico (PHE): el medio físico complementa al medio socio-económico y medio perceptual en la que es la conformación global del concepto de Medio Ambiente. Está compuesto por dos sub-factores, como son:
  - Medio abiótico (AB): este medio engloba el conjunto de las variables físicas ambientales de carácter inerte. Está compuesto por gran número de parámetros medioambientales, desde la hidrología hasta la geología y condiciones geotécnicas propias de un entorno localizado. Se trata de un sub-factor de relevancia para el caso que estudiamos, esto es la restauración de grandes desmontes, dado que los parámetros que incluye tienen una influencia directa en la erosionabilidad de los taludes y, en última instancia, en la pérdida de suelo fértil, lo que a su vez, y aún más en condiciones de alto estrés hídrico, condiciona fuertemente la regeneración vegetal y, por ende, del ecosistema que se intenta restaurar (Moreno-de las Heras et al, 2011).
  - Medio biótico (BI): la existencia de la propia vía afecta directamente a la distribución de las poblaciones de mamíferos y aves en sus alrededores, de forma que cuanto más cerca de la misma, menos individuos es posible encontrar. Así, este efecto, para el caso de las aves, alcanza distancias de un kilómetro, las cuales, para los mamíferos, se incrementan incluso hasta los cinco kilómetros (Benítez-López et al, 2010).
- Factor funcional (FUN): para este factor, el cual describe la capacidad de dar un servicio por parte de la solución empleada para restaurar un desmonte, puede descomponerse en distintas componentes. Sin embargo, para el caso concreto objeto de tesis, se ha entendido que deriva de dos sub-factores, como son:

- Seguridad vial (SA): este aspecto, siempre relevante, lo es aún más, si cabe, a la hora de elegir una u otra solución en áreas onduladas o colinadas (Fu et al, 2011). Por ejemplo, la solución de falso túnel (cut-and-cover tunnel) implica una forma diferente de conducción por parte de los usuarios de la vía (Calvi et al, 2012), lo que añade riesgos que no existen en otras alternativas.
- Impacto sobre los usuarios durante la construcción (US): es este, dentro del factor funcional, un aspecto que adquiere entidad en el caso que nos ocupa, en tanto el mismo se refiere a la restauración de taludes en vías que ya existen. Esto supone que, al estar las mismas en uso, la solución escogida, y su consecuente modo de ejecución, podrá afectar a los referidos usuarios en mayor o menor medida.
- Factor Territorial (TEC): Este factor, el cual atiende a la estructura del territorio en el que se inserta la vía objeto de restauración, puede descomponerse en diversas componentes de todas las cuales, sin embargo y a efectos del análisis ahora realizado, cabe referirse a tres:
  - Coordinación con el planeamiento territorial (TE): Se hace necesarios que el trazado de la carretera sea consistente con el planeamiento actual y futuro. De ello que las soluciones posibles a llevar a cabo en la restauración de grandes taludes de desmonte, está también condicionada por las disposiciones urbanísticas o territoriales que se deriven del planeamiento referido. Asimismo, la restauración a ejecutar puede convertirse en un elemento de rediseño más verde del propio planeamiento territorial, en el sentido de que puede ayudar a aumentar la conectividad ecológica de la trama existente. En relación con esto último, es importante referirse a que algunos órganos competentes en materia de territorio de diversas partes del planeta, diseñan su planeamiento urbanístico futuro como un entramado de corredores ecológicos, lo que mejora tanto la

antes referida conectividad ecológica como el propio medio social en el que se inserta tal territorio (Yu et al, 2012).

- Ocupación en planta (HO): la existencia de grandes taludes de desmorte implica la pérdida concreta de superficie de los hábitats afectados.
- Fragmentación de Hábitats (FR): la fragmentación de hábitats existentes a razón de la construcción de infraestructuras lineales, especialmente de transporte, es un tema que viene siendo tratado con profusión desde hace tiempo. Es así que el manual europeo de tal temática (Iuell et al., 2003) da las líneas generales a seguir para la elección de los distintos tipos de paso de fauna en función, únicamente, de este grave problema. Su entidad le confiere un peso especial en el análisis objeto de la presente tesis. En nuestro caso, debemos considerar la amplitud del problema que se está acometiendo, que va más allá del análisis de este sub-factor, si bien como se dice, el mismo presenta una entidad muy importante dentro de tal estudio. Es decir, por ejemplo y desde el punto de vista de la fragmentación de ecosistemas, para las vías de transporte de gran capacidad, el problema sólo puede acometerse mediante la elevación o enterramiento de grandes tramos de infraestructura (Alexander y Waters, 2000). Sin embargo, atendiendo a la amplitud del problema que estamos considerando y que, como se está poniendo de manifiesto, abarca un conjunto grande de factores y sub-factores, no es esta la única respuesta para alcanzar el fin buscado, esto es, restaurar globalmente un punto elegido de una vía de transporte afectado por un gran talud de desmorte. Es decir, el objeto, como se ha dicho, es alcanzar un objetivo global de restauración, dado que sólo así es posible garantizar la realidad conocida de que una infraestructura verde (Green Infrastructure) asociada a la citada restauración, asegura un medioambiente saludable y, en consecuencia, beneficios físicos y psicológicos para cuantos allí habitan (Tzoulas et al, 2007).

- Factor económico (ECO): este factor se divide a su vez en dos subfactores, tales como:
  - Coste de construcción de la solución (CO)
  - Coste de mantenimiento (OM)

Nos estamos refiriendo a la habitual interpretación de estos aspectos económicos.

Terminar este sub-apartado haciendo referencia al criterio económico sirve para enlazar con una idea fundamental como es que, es muy importante y en favor de alcanzar planteamientos de restauración verdaderamente sostenibles, considerar que la restauración del capital natural debe hacerse incluyendo también valores no económicos (Blignaut et al, 2014; Canto-Perelló y Curiel-Esparza, 2006).

#### **4.1.3 Definición de estrategias de restauración**

Existen soluciones distintas para corregir alteraciones concretas generadas por un desmante de entidad en una vía de transporte. Dependiendo del aspecto que se esté estudiando, podrá pensarse, de forma parcial, en unas u otras de ellas. Así, pro ejemplo, si se trabaja en la problemática del paisaje, la preocupación podrá ser la de aterrizar los desmontes, generando bermas que faciliten el desarrollo de especies vegetales de alto porte que, con su volumen, oculten el desmante a la vista de los usuarios de la vía. Si lo que se pretende es salvaguardar la fauna de los terrenos adyacentes a la vía, podrá optarse por disponer pantallas acústicas en la coronación de los desmontes. Si el problema particular que se trata es el de la estabilidad de los taludes, podrá ejecutarse un bulonado, o un gunitado, u optarse por la disposición de mallas, etc. Es decir, si se trata una problemática concreta en un desmante, se optará por una solución de entre un grupo concreto de tales soluciones.

Sin embargo, en el presente documento y como ya se ha explicado en diferentes ocasiones, se busca la restauración global de la problemática total que lleva aparejada la existencia de un gran desmante. Es por ello por lo que no se puede

pensar en soluciones concretas sino, antes bien, en estrategias de restauración (así las denominamos en la presente tesis) las cuales están constituidas por conjuntos de soluciones complementarias, cada una de las cuales atiende la corrección de un impacto concreto. Y es que se recuerda, por haberse ya comentado en anterior apartado, que la restauración de estos taludes es un problema cuya amplitud incluye diferentes alteraciones e implicaciones.

Por otra parte, y volviendo a los grupos de soluciones que responden a problemas muy concretos, se tiene que dentro de la problemática que supone la fragmentación de hábitats, un estudio reciente muestra que la tendencia ha sido hacia el diseño y construcción de tipologías de paso inferior (underpass), lo que se ha dado en un 95.4% de los casos estudiados, frente a tipologías de paso superior (overpasses) (Sorolla y Solina, 2013). Esto lleva a suponer que, antes problemas concretos, se emplean, de forma sistemática, soluciones muy concretas habitualmente fundamentadas en unos pocos criterios de selección y, aún más, sesgadas por el criterio económico.

Asimismo, sólo el 1.6% de los pasos inferiores estudiados fueron específicos para fauna mientras que para los pasos superiores, cerca del 45% fueron ecoductos y pasos específicos para fauna. Es decir, sólo en casos muy especiales en los que el condicionante ambiental pudo presentar mucha entidad, se rompió la tendencia y se optó por una solución distinta a la que, de forma mecánica, se aplica habitualmente.

Continuando dentro de la problemática de la fragmentación de hábitats, encontramos otro caso interesante que describe cómo puede funcionar a la hora de inclinarse por una solución concreta, pese a que la misma pueda no estar suficientemente verificada por la experiencia. En el caso de los pasos inferiores u obras de drenaje transversal ya existentes, es habitual proceder a la modificación de las mismas mediante la disposición de sobre cunetas secas (dry ledges), elementos a modo de acera volada sitos en alguna de las márgenes del mismo y adheridos a un cajero, los cuales pueden favorecer que ciertas especies puedan utilizarlos para paso. Sin embargo, hay una falta de conocimiento en torno a la efectividad de tales elementos (Villalva et al, 2013; Bager y Fontoura, 2013), no obstante lo cual y como se ha comentado en los resultados del

estudio antes referido, se emplean ampliamente, presumiblemente en base al criterio económico antes que a cualquier otro, dado que este tipo de solución está entre las más baratas que es posible llevar a cabo al objeto de mejorar la permeabilidad de la vía existente.

Con todo, y como se ha dicho, para el presente trabajo se han propuesto una serie de conjuntos de soluciones complementarias, cada una de las cuales suponía una estrategia de restauración. Así pues, se han elaborado seis estrategias de restauración en base a la idea de combinar soluciones particulares que diesen estrategias más blandas o más duras o, dicho de otro modo, más o menos exigentes en recursos, pero siempre efectivas en conjunto.

Así pues, las estrategias de restauración que se han manejado en el caso presente han sido las que se relacionan a continuación:

- Irregularización del talud (rock outcrops generation) (ROO)
- Tratamiento de los taludes con medidas de bio-ingeniería (SBI)
- Aterrazamientos (Terracing cuttings) (TER)
- Paso superior acondicionado para el paso de fauna (WOV)
- Paso inferior acondicionado para el paso de fauna (WUN)
- Falso túnel (cut-and-cover) (CUT)

Seguidamente se desarrollan todas ellas:

- Irregularización del talud (rock outcrops generation) (ROO): En este caso se trata de combinar las siguientes soluciones:
  - Una solución blanda de restauración de los taludes en sí, mediante la irregularización de los mismos, a fin de permitir que aquéllos se naturalicen por sí mismos (Meirelles et al., 1999) y al

objeto de corregir el impacto paisajístico y, especialmente, de permitir el crecimiento desordenado de vegetación que genere la creación de pequeños hábitats (Tadeu et al., 1999). Asimismo, y para conseguir un mejor efecto estético, es posible redondear la coronación de los desmontes (rounding off the tops of the cuttings).

- Una solución de paso de fauna en algún punto de cruce de la misma, en las proximidades del talud de desmonte que se pretende restaurar, al objeto de minimizar el efecto barrera (Mata et al., 2008).
- Tratamiento de los taludes con medidas de bioingeniería (SBI): en este caso se hace referencia a la combinación de las siguientes soluciones:
  - Una solución consistente en la ejecución, sobre los taludes de desmonte, de diferentes soluciones de bioingeniería, desde mallas de fibra de coco hasta geoceldas, todo ello en función de la naturaleza del desmonte. Esto favorecería el crecimiento de las plantas sobre los referidos taludes, creando nuevos hábitats, mejorando paisajísticamente la inserción de la vía en el entorno y aumentando la estabilidad de los taludes gracias al efecto favorecedor que suponen las raíces de las especies vegetales asentadas (Garg et al, 2014).
  - Una solución de paso de fauna en algún punto de cruce de la misma, en las proximidades del talud de desmonte que se pretende restaurar, al objeto de minimizar el efecto barrera (Mata et al., 2008).
- Aterrazamientos (Terracing cuttings) (TER): Las soluciones que componen esta estrategia son las que se apuntan a continuación:
  - Una solución de restauración directa de los desmontes, como en los dos casos anteriores, pero ahora consistente en la generación

de bermas, cada cierta distancia, al objeto de que en las mismas pueda desarrollarse vegetación arbustiva y arbórea. Además, en este caso el efecto de control de la erosión del suelo es importante (Dumbrovskýa et al, 2014) y aún mayor que en los casos citados. aún cuando supone una mayor ocupación en planta y un mayor coste económico, presenta evidentes beneficios medioambientales.

- Una solución de paso de fauna en algún punto de cruce de la misma, en las proximidades del talud de desmonte que se pretende restaurar, al objeto de minimizar el efecto barrera (Mata et al., 2008).
- Paso superior acondicionado para el paso de fauna (WOV): esta estrategia consiste en la construcción de un paso superior que comunique ambos márgenes de la vía pero ubicado en un punto en el que la fauna local, por las que son sus pautas de comportamiento, puede ver favorecido el cruce de aquella (Olsson et al, 2008). Asimismo, deben adaptarse a las especies a cuyo empleo se destina. Esta solución debería, asimismo, acompañarse de alguna otra solución blanda para el tratamiento de los taludes, como ROO o similar.
- Paso inferior acondicionado para el paso de fauna (WUN): Esta estrategia incluye diferentes tipologías de estructuras de paso (Ng et al, 2004) como, por ejemplo, túneles hincados y adaptados para el uso compartido o exclusivo de la fauna local. Esta solución debería, asimismo, acompañarse de alguna otra solución blanda para el tratamiento de los taludes, como ROO o similar.
- Falso túnel (CUT): esta estrategia consiste en el desarrollo de una única solución constructiva, como es la ejecución de un falso túnel, a fin de obtener lo que se denomina un puente verde (landscape bridge) (Iuell et al., 2003). Este puede considerarse como un caso particular de paso inferior o superior, dependiendo de interpretaciones, pero su característica diferencial es que es mucho más largo que aquéllos,

cubriendo así una importante longitud del tramo de vía restaurado, y supone, por sí mismo, la corrección de los impactos que se derivan de la existencia en sí de los taludes sin que sea, por tanto, necesario proceder a la ejecución de soluciones complementarias.

## 4.2 Resultados del AHP

En base a lo descrito en anteriores apartados, se ha procedido a realizar, primeramente, el árbol de Saaty para el caso en estudio. De esa forma, es posible establecer el marco de comparación a partir del cual arrancará, posteriormente, el método propio de la AHP.

El objeto del presente apartado es el de mostrar la forma en que se han aplicado las distintas metodologías expuestas y propuestas, asimismo, para el tratamiento de los datos.

Como se puede observar, el árbol recoge una serie de criterios los cuales se fundamentan en la forma de proceder más habitualmente aceptada, hoy día, para la caracterización del medio ambiente.

Sin embargo, y dada la amplitud que le corresponde a tal caracterización, estos criterios se han particularizado para el caso concreto del problema objeto de análisis.

Estos criterios serán, de un lado, ponderados mediante el método DELPHI y, de otro, servirán, ya en aplicación del modelo AHP, para la comparación de las alternativas recogidas, lo que se llevará a cabo comparándolas dos y dos y para cada uno de tales criterios.

Es importante referirse a que el árbol de Saaty aportado a continuación, y que, como tal es su función, regirá el proceso matemático propio de la metodología AHP, se ha propuesto que pueda aplicarse para diferentes intervalos de alturas de talud, con el objetivo último de poder conocer la idoneidad de las soluciones especificadas para cada uno de ellos.

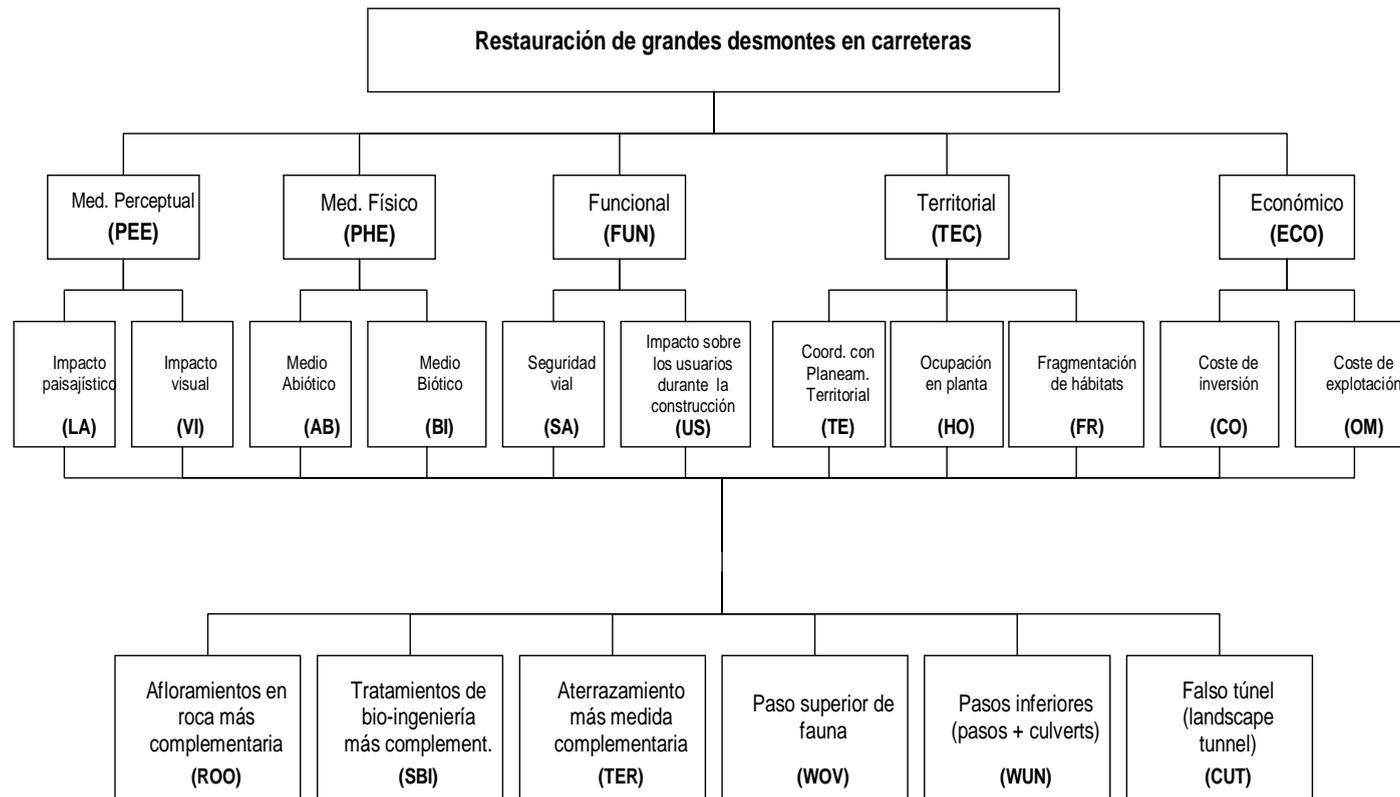


Figure 20. Estructura de Jerarquía para el problema de restauración de grandes desmontes de carretera

#### 4.2.1 **Matriz de comparación por pares para cada factor considerado**

Como se ha comentado en anteriores apartados, se ha obtenido la información básica para este trabajo a partir de la aplicación del método Delphi a un grupo de expertos. A esa información fundamental recogida, se le han aplicado una serie de metodologías matemáticas de decisión multicriterio.

La primera de ellas ha sido el *Analytic Hierarchy Process* (AHP) que traducimos como Proceso Analítico de Jerarquización. Es este un método que facilita la toma de decisiones mediante la descomposición una situación compleja en sus componentes, tomando esas partes y jerarquizándolas de acuerdo a su prioridad en el sistema global (Saaty, 2012). Para ello, y en el caso concreto que nos ocupa, se emplea una escala de diecisiete puntos-item, al objeto de evaluar los principales criterios y sub-criterios a través de un cuestionario, así como las estrategias de restauración propuestas, y todo ello con respecto al objetivo global que se ha marcado.

*Con respecto al objetivo global: posibles estrategias para la restauración de desmontes en carreteras*

---

Q01	Cómo de importante es el Medio Perceptual (PEE) cuando se compara con el Medio Físico (PHE)
Q02	Cómo de importante es el Medio Perceptual (PEE) cuando se compara con el factor Funcional (FUN)
Q03	Cómo de importante es el Medio Perceptual (PEE) cuando se compara con el factor Territorial (TEC)
Q04	Cómo de importante es el Medio Perceptual (PEE) cuando se compara con el factor. Económico (ECO)

---

Q05	Cómo de importante es el Medio Físico (PHE) cuando se compara con el factor Funcional (FUN)
Q06	Cómo de importante es el Medio Físico (PHE) cuando se compara con el factor Territorial (TEC)
Q07	Cómo de importante es el Medio Físico (PHE) cuando se compara con el factor. Económico (ECO)

---

Q08	Cómo de importante es el factor Funcional (FUN) cuando se compara con el factor Territorial (TEC)
Q09	Cómo de importante es el factor Funcional (FUN) cuando se compara con el factor Económico (ECO)

---

Q10	Cómo de importante es el factor Territorial (TEC) cuando se compara con el factor. Económico (ECO)
-----	--

---

Tabla 5. Cuestionario para la evaluación de los principales criterios.

En primer lugar, pues, cada experto ha realizado una comparación por parejas a fin de indicar su preferencia para cada criterio y sub-criterio, o factor y sub-factor en nuestro caso.

En la tabla 5 se muestra el cuestionario usado para la evaluación, por parte de cada experto y como se dice, de los distintos sub-criterios estimados.

En la tabla 6 se aporta la plantilla de valoración para la comparación por pares de los sub-factores. El mismo formato y la misma escala ha sido empleada para el caso de los factores.

Asimismo, en la tabla 7 y 8 se aportan los juicios obtenidos, del conjunto de expertos consultados, para los criterios y sub-criterios manejados.

	Más preferido que								Igual		Menos preferido que								
Impacto paisajístico	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Impacto visual	
Medio abiótico	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Medio biótico	
Seguridad vial	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Afección a usuarios durante la construcción	
Coordinación con el Planeamiento Territorial	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Ocupación en planta	
Coordinación con el Planeamiento Territorial	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Fragmentación Territorial	
Ocupación en planta	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Fragmentación Territorial	
Coste de inversión	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Coste de explotación	

Tabla 6. Plantilla para la evaluación de los sub-factores

**Resultados para cada experto**

<b>Comparación por pares de factores</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>Media geométrica</b>
Medio Perceptual	vs. Medio Físico	1/3	1/3	1/2	1/3	1/3	1/4	1/4	1/2	1/3	2	2	1/3	0.4581
Medio Perceptual	vs. Funcional	1	1/2	1/9	1/5	1	1/8	1/6	2	1/5	4	1	2	0.5485
Medio Perceptual	vs. Territorial	1	1	1/4	5	1	1/2	1/8	4	3	1	1	2	1.0538
Medio Perceptual	vs. Económico	3	2	1/6	3	1	1	4	3	1/3	5	2	1	1.4901
Medio Físico	vs. Funcional	3	1	1/9	1/3	1	1/6	2	3	1/3	3	1	3	0.9124
Medio Físico	vs. Territorial	1/2	2	1/4	7	3	4	1/2	5	3	2	1	2	1.7111
Medio Físico	vs. Económico	2	3	1/5	5	2	3	4	4	1/3	4	2	1	1.8429
Funcional	vs. Territorial	1/2	2	8	9	5	8	1	3	5	1/2	1	1	2.2972
Funcional	vs. Económico	1	2	6	7	4	6	8	2	3	1	1	1/2	2.4569
Territorial	vs. Económico	3	1	1/3	1/3	1/4	2	6	1/2	1/3	1	2	2	0.9666

Tabla 7. Valoración obtenida por los pares de factores comparados, para cada experto consultado

**Resultados para cada experto**

<b>Comparación por pares de sub-factores</b>			<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>Media geométrica</b>
Impacto paisajístico	vs.	Impacto visual	1	2	1	3	2	2	6	1	2	1	1	3	1.7567
Medio abiótico	vs.	Medio biótico	5	1/3	1/5	1/3	1/2	1/4	1	1	1/5	2	1	1/2	0.6123
Seguridad vial	vs.	Afección a usuarios durante la constr.	1	4	6	3	4	4	8	1	5	3	2	2	3.0099
Coordinación con el Planeam. Territorial	vs.	Ocupación en planta	1	1	7	1/3	4	5	8	1/2	1/3	1/2	1/3	1/3	1.1085
Coordinación con el Planeam. Territorial	vs.	Fragmentación Territorial	1/6	1/3	3	3	6	1	8	1/3	1/3	1/3	1/3	1/2	0.8525
Ocupación en planta	vs.	Fragmentación Territorial	1/6	1/3	1/5	5	2	1/4	2	1/5	1/3	1/5	1	1	0.5484
Coste de inversión	vs.	Coste de explotación	3	3	1	3	1/2	2	1/8	1	1/5	2	2	2	1.1509

Tabla 8. Valoración obtenida por los pares de sub-factores comparados, para cada experto consultado

En segundo lugar, las valoraciones individuales de cada experto, para los distintos criterios y sub-criterios, se agregan mediante la obtención del valor de la media geométrica (Dong et al, 2010). Ello se ha realizado en base al método de Agregación de Juicios Individuales (AIJ).

Así, con todo, la matriz A obtenida de la agregación comentada de los juicios de los expertos para los criterios adopta la forma que se muestra a continuación:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0.4581 & 0.5485 & 1.0538 & 1.4901 \\ 2.1832 & 1 & 0.9124 & 1.7111 & 1.8429 \\ 1.8233 & 1.0960 & 1 & 2.2972 & 2.4569 \\ 0.9490 & 0.5844 & 0.4353 & 1 & 0.9666 \\ 0.6711 & 0.5426 & 0.4070 & 1.0345 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

El vector de prioridades buscado ( $\omega$ ) es el vector propio que corresponde al mayor autovalor ( $\lambda_{\max}$ ) de A de acuerdo con Saaty (1980). Para encontrar el referido vector propio, ha de resolverse el sistema de ecuaciones lineales siguiente:

$$A\omega = \lambda\omega \quad (18)$$

La resolución del mismo se realiza a través de la ecuación característica de la matriz A, el cual se expresa como sigue:

$$\det(A - \lambda I) = 0 \quad (19)$$

Así pues, y procediéndose del modo descrito, el vector de prioridades para los criterios (criteria's priority vector) obtenido es el que se señala a continuación:

$$\omega = [0.1564 \ 0.2717 \ 0.3030 \ 0.1399 \ 0.1291] \quad (20)$$

Una de las ventajas del método AHP es que el grado de inconsistencia, por parte de los expertos, en el proceso de evaluación puede ser medido. En ocasiones ocurre que los expertos no consiguen expresar preferencias consistentes en casos en los que el número de criterios comienza a ser elevado.

A fin de acometer esta cuestión, el método de Saaty permite, frente a muchos otros que no albergan tal ventaja, medir la inconsistencia en la matriz de comparación de pares, para lo cual el método da un umbral de consistencia que garantiza que, mientras no se supere, las respuestas dadas son coherentes las unas con las otras.

El ratio de consistencia (CR) es el principal indicador con el que poder medir el grado de consistencia. El CR se calcula a partir del cociente entre el índice de consistencia (CI) y el índice de consistencia aleatorio (RCI). El primero de ellos, esto es, el índice de consistencia (CI), se calcula a partir de la expresión ya aportada en anterior apartado, y que se recuerda que adopta la forma:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (21)$$

El valor del índice de consistencia aleatorio (RCI) es fijo y depende del orden de la matriz (Saaty, 2012). Por ejemplo, la matriz A obtenida para la evaluación de los criterios a partir de la agregación de los juicios de los expertos, tiene orden cinco y, por lo tanto, el valor de CR, de acuerdo con Saaty, debe ser menor o igual a 0.10 para ser considerado aceptable. En caso contrario, los juicios deben ser revisados.

Con todo, es posible dar el vector de prioridades con su correspondiente análisis de consistencia, tal como se muestra en la tabla 9.

	<b>PEE</b>	<b>PHE</b>	<b>FUN</b>	<b>TEC</b>	<b>ECO</b>	<b>Vector de prioridades</b>
<b>PEE</b>	1.0000	0.4581	0.5485	1.0538	1.4901	<b>0.1564</b>
<b>PHE</b>	2.1832	1.0000	0.9124	1.7111	1.8429	<b>0.2717</b>
<b>FUN</b>	1.8233	1.0960	1.0000	2.2972	2.4569	<b>0.3030</b>
<b>TEC</b>	0.9490	0.5844	0.4353	1.0000	0.9666	<b>0.1399</b>
<b>ECO</b>	0.6711	0.5426	0.4070	1.0345	1.0000	<b>0.1291</b>

$\lambda_{max}=5.0311$   $CI=0.0077$   $CR=0.0069<0.1$

Tabla 9. Vector de prioridades y análisis de consistencia de la matriz de c.p.p de los factores

Este mismo proceso se ha seguido para los sub-criterios. Así, los vectores de prioridad, y sus consistencias, de las matrices de comparación por pares para la los sub-factores en que se han descompuesto los distintos criterios analizados en este caso, se muestran en la tabla 10.

	<b>LA</b>	<b>VI</b>	<b>Vector de prioridades</b>
<b>LA</b>	1.0000	1.7567	<b>0.6373</b>
<b>VI</b>	0.5692	1.0000	<b>0.3627</b>

Tabla 10a. Vector de prioridades para la matriz de comparación de sub-factores del FACTOR MEDIO PERCEPTUAL

	<b>AB</b>	<b>BI</b>	<b>Vector de prioridades</b>
<b>AB</b>	1.0000	0.6123	<b>0.3798</b>
<b>BI</b>	1.6332	1.0000	<b>0.6202</b>

Tabla 10b. Vector de prioridades para la matriz de comparación de sub-factores del FACTOR MEDIO FÍSICO

	<b>SA</b>	<b>US</b>	<b>Vector de prioridades</b>
<b>SA</b>	1.0000	3.0099	<b>0.7506</b>
<b>US</b>	0.3322	1.0000	<b>0.2494</b>

Tabla 10c. Vector de prioridades para la matriz de comparación de sub-factores del FACTOR FUNCIONAL

	<b>TE</b>	<b>HO</b>	<b>FR</b>	<b>Vector de prioridades</b>
<b>TE</b>	1.0000	1.1085	0.8525	<b>0.3206</b>
<b>HO</b>	0.9021	1.0000	0.5484	<b>0.2584</b>
<b>FR</b>	1.1730	1.8236	1.0000	<b>0.4210</b>
$\lambda_{max}=3.0127$ $CI=0.0063$ $CR=0.0122<0.1$				

Tabla 10d. Vector de prioridades para la matriz de comparación de sub-factores del FACTOR TERRITORIAL.

	<b>CO</b>	<b>OM</b>	<b>Vector de prioridades</b>
<b>CO</b>	1.0000	1.1509	<b>0.5351</b>
<b>OM</b>	0.8689	1.0000	<b>0.4649</b>

Tabla 10e. Vector de prioridades para la matriz de comparación de sub-factores del FACTOR ECONÓMICO

Se observa que, para los factores compuestos por dos sub-factores no se ha aportado la consistencia, dado que esta es total, en tanto la comparación se hace entre dos elementos. Sin embargo, para el factor "Territorial" sí se aporta el análisis de consistencia, dado que, por tratarse de tres sub-factores, el mismo es pertinente.

Finalmente, componiendo los resultados para los criterios, de un lado, y los sub-criterios de otro, se ha obtenido el valor global para cada uno de estos últimos, esto es, de los sub-factores, todo lo cual se muestra en la tabla 11.

<b>Factor</b>	<b>Sub-factor</b>	<b>1º nivel Factores</b>	<b>2º nivel Sub-factores</b>	<b>Valor global</b>
<i>Medio Perceptual</i>	Impacto paisajístico	0.1564	0.6373	<b>0.0997</b>
	Impacto visual		0.3627	<b>0.0567</b>
<i>Medio Físico</i>	Medio abiótico	0.2717	0.3798	<b>0.1032</b>
	Medio biótico		0.6202	<b>0.1685</b>
<i>Funcional</i>	Seguridad vial	0.3030	0.7506	<b>0.2274</b>
	Afección a usuarios durante la construcción		0.2494	<b>0.0756</b>
<i>Territorial</i>	Coordinación con el planeamiento territorial	0.1399	0.3206	<b>0.0448</b>
	Ocupación en planta		0.2584	<b>0.0361</b>
	Fragmentación de hábitats		0.4210	<b>0.0589</b>
<i>Económico</i>	Coste de inversión	0.1491	0.5351	<b>0.0691</b>
	Coste de explotación		0.4649	<b>0.0600</b>

Tabla 11. Valores globales obtenidos para los factores y sub-factores.

Los resultados ahora obtenidos, y recogidos en la tabla anterior, es posible expresarlos de forma gráfica de acuerdo a como se muestra en la figura 21. En la misma se representan dos anillos concéntricos, de forma que el exterior hace referencia a los criterios y el interior a los sub-criterios que corresponden a cada uno de aquéllos.

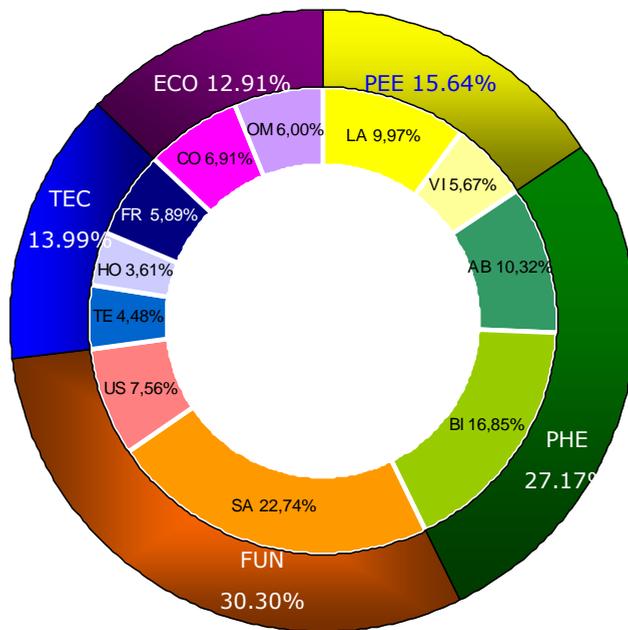


Figura 21. Pesos de los factores que intervienen en la selección de alternativas

#### **4.2.2 *Matriz de comparación por pares para cada estrategia de restauración, en relación a cada factor***

Llegado este punto en el que, para cada sub-factor, los expertos han procedido a indicar su preferencia entre pares de estrategias restauradoras, ha sido necesario proceder a la agregación de todos los juicios a fin de, con ello, poder construir las matrices de comparación por pares. Para ello se ha aplicado el método de agregación AIJ explicado en un capítulo anterior, obteniéndose los juicios globales los cuales pueden tratarse como juicios de un solo individuo.

Los cálculos de agregación de juicios realizados en este caso, y para cada sub-factor, se aportan en las tablas 12 a 22. Estas tablas se aportan en el anexo dispuesto a tal efecto. Como se dice, es de cada una de ellas desde las que ha sido posible obtener las matrices de comparación por pares de las estrategias, las cuales se recogen en la tabla 25, junto con su pertinente análisis de consistencia.

Una vez realizadas las agregaciones de juicios comparativos mostradas en las tablas anteriores, se construyen las matrices de comparación por pares para las estrategias, tantas como sub-factores hemos manejado, esto es, once. La forma de proceder ha sido la misma que la descrita para el caso de los criterios, con lo que, como se ha visto, se ha hecho a partir de la obtención de la media geométrica de los juicios de los expertos.

<b>FACTOR</b>	<b>Acrónimo Factor</b>	<b>Acrónimo Sub-Factor</b>	<b>DESCRIPCIÓN DE SUB-FACTORES</b>
<b>Medio Perceptual - Perceptual environment</b>	PEE	LA	Impacto sobre el paisaje - Landform impact (LA)
		VI	Impacto visual - Visual impact (VI)
<b>Medio Físico - Physical environment</b>	PHE	AB	Medio Abiótico - Abiotic environm. (AB)
		BI	Medio Biótico - Biotic environm. (BI)
<b>Funcional - Functional</b>	FUN	SA	Seguridad vial - Road safety (SA)
		US	Afección a usuarios durante la construcción - Users affection during construction (US)
<b>Territorial</b>	TEC	TE	Coordinación con el Planeamiento Urbanísticos y Territorial - Territorial planning coordination (TE)
		HO	Ocupación en planta - Horizontal occupation area (HO)
		FR	Fragmentación de Hábitats - Ecosystem Fragmentation (FR)
<b>Económico - Economical</b>	ECO	CO	Coste de construcción - Construction cost (CO)
		OM	Mantenimiento - O&M costs (OM)

Tabla 23. Acrónimos empleados para denotar a los distintos factores y sub-factores propuestos.

Posteriormente, el auto-vector buscado se calcula para obtener, en consecuencia, el vector de prioridades, así como se ha acometido el análisis de consistencia en todos y cada uno de tales casos.

Así, se obtienen y muestran seguidamente, en la tabla 25, las matrices de comparación por pares de las estrategias para cada uno de los sub-factores. Previamente se aportan dos tablas, 23 y 24, en las que, a modo de recordatorio, se recogen los acrónimos empleados para los factores y estrategias de restauración, al objeto de facilitar la más rápida identificación de los elementos que componen la tabla de matrices antes referida.

<b>DESCRIPCIÓN DE LA ESTRATEGIA DE RESTAURACIÓN</b>	<b>Acrónimo</b>
Afloramientos en taludes - Rockoutcrops	<b>ROO</b>
Medidas de bio-ingeniería - Slopes with bio-defense mesures	<b>SBI</b>
Aterrazamiento - Terracing or grading out cuttings	<b>TER</b>
Pasos superiores aptos para fauna - Green overpass	<b>WOV</b>
Pasos inferiores aptos para fauna - Wildlife underpass	<b>WUN</b>
Falso túnel - Cut and Cover tunnel	<b>CUT</b>

Tabla 24. Acrónimos empleados para denotar las distintas estrategias de restauración propuestas.

Seguidamente se las prioridades para la matriz de comparación por pares para las seis estrategias de restauración, con respecto a cada sub-factor considerado, así como el análisis de consistencia correspondiente a cada una de ellas.

Finalmente, es posible obtener la matriz de prioridades D para las estrategias de restauración contempladas, la cual se muestra en la tabla 26.

	LA	VI	AB	BI	SA	US	TE	HO	FR	CO	OM
<b>ROO</b>	0.1728	0.1626	0.2190	0.1782	0.1250	0.2618	0.1345	0.1344	0.0993	0.3340	0.3349
<b>SBI</b>	0.1440	0.1555	0.2418	0.1634	0.1420	0.2407	0.1578	0.1788	0.1156	0.1993	0.1384
<b>TER</b>	0.1682	0.1605	0.1639	0.1251	0.1588	0.1800	0.0961	0.0898	0.0930	0.1954	0.2293
<b>WOV</b>	0.1213	0.1214	0.1021	0.1631	0.1816	0.0996	0.1537	0.1759	0.1842	0.0937	0.1093
<b>WUN</b>	0.1407	0.1517	0.1084	0.1875	0.1968	0.1321	0.2349	0.2401	0.2213	0.1078	0.1116
<b>CUT</b>	0.2526	0.2480	0.1646	0.1824	0.1954	0.0856	0.2228	0.1807	0.2864	0.0695	0.0763

Tabla 26. Matriz de decisión para las estrategias consideradas

Esta matriz, y los valores globales calculados anteriormente para cada criterio y sub-criterio, se usan en la implementación posterior del método VIKOR de lo que, como se verá, obtendremos la jerarquización de las estrategias de restauración.

No obstante lo ahora comentado, el método AHP permite, a partir de la matriz anterior y de la de prioridades de los pesos de los criterios, obtener F, matriz ésta que expresa la jerarquización de las alternativas. De esta forma se tiene que:

$$F = D \cdot \omega = \begin{bmatrix} 0.1872 \\ 0.1686 \\ 0.1539 \\ 0.1430 \\ 0.1666 \\ 0.1807 \end{bmatrix} \quad (21)$$

Es decir, los pesos (prioridades globales) asignados a los factores manejados, en base a la metodología AHP empleada, son los que siguen:

<b>Estrategia</b>	<b>Acrónimo</b>	<b>Prioridad global (peso)</b>	<b>Posición jerárquica</b>
Afloramientos de rocas	ROO	18.72%	1
Medidas de bioingeniería	SBI	16.86%	3
Aterrazamiento	TER	15.39%	5
Pasos superiores de fauna	WOV	14.30%	6
Pasos inferiores	WUN	16.66%	4
Falsos túneles	CUT	18.07%	2

Tabla 27. Prioridades globales para las estrategias derivadas de AHP

La priorización conseguida con la metodología AHP se deriva de las preferencias absolutas que los expertos consultados. Como se observa, ninguna destaca sobre las restantes de forma muy visible, lo que supone, no obstante la jerarquización practicada, una amalgama de estrategias algo confusa. Esto mismo se observa con más claridad en la figura 22, donde la distancia, por ejemplo, entre las estrategias más preferidas es mínima.

### Jerarquización de estrategias (según AHP)

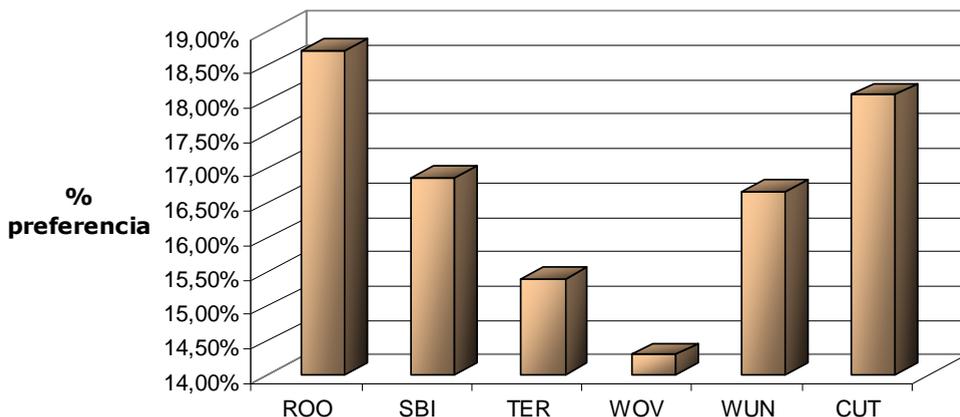


Figura 22. Representación de las prioridades globales para las estrategias derivadas de AHP

Es por todo ello por lo que se ha empleado un método multi-criterio como el VIKOR, descrito anteriormente y que, seguidamente, se expone en su aplicación al caso concreto que nos ocupa. Este método, frente a la jerarquización estricta que realiza AHP, aporta la búsqueda de la solución que, siendo o estando entre las más preferidas, se encuentra asimismo entre las que menos rechazo general produce. Es por ello por lo que, en un caso como el presente, en el que, como se ha visto, no hay diferencias significativas entre las alternativas manejadas como resultado de la aplicación de AHP, el método VIKOR es altamente aconsejable y muy útil para poder extraer conclusiones más aquilatadas.

### 4.3 Aplicación del método VIKOR

El método VIKOR ya se ha descrito en anterior apartado. En este caso se aplica a fin de evaluar las prioridades asignadas a cada una de las estrategias de restauración que se han manejado en este trabajo.

El método jerarquiza las estrategias  $H_i$  de acuerdo con el valor de tres escalares (S, R y Q) calculados para cada opción. El valor mínimo de S representa una mayor utilidad, mientras que R aporta el menor disgusto que la estrategia supone en relación con las restantes.

Con ello, y combinando adecuadamente los valores S y R de acuerdo a la expresión que da forma a Q, se obtiene un valor que nace del consenso de los citados escalares S y R. Los elementos  $f_{ij}$  de la matriz de vectores de prioridad mostrada en la tabla 28 son el input del procedimiento establecido por el método VIKOR.

Así pues, los pasos seguidos han sido los siguientes:

1.- Para cada sub-factor, se determinan los valores  $f_i$  mejor y peor, denotando al mejor como  $f_i^*$  y al peor como  $f_i^-$ .

	<b>ROO</b>	<b>SBI</b>	<b>TER</b>	<b>WOV</b>	<b>WUN</b>	<b>CUT</b>	<b>f*</b>	<b>f-</b>
<b>LA</b>	0.1729	0.1441	0.1683	0.1214	0.1407	0.2527	0.2527	0.1214
<b>VI</b>	0.1626	0.1555	0.1606	0.1214	0.1517	0.2481	0.2481	0.1214
<b>AB</b>	0.2190	0.2419	0.1639	0.1022	0.1085	0.1646	0.2419	0.1022
<b>BI</b>	0.1783	0.1635	0.1251	0.1632	0.1875	0.1824	0.1875	0.1251
<b>SA</b>	0.1250	0.1421	0.1589	0.1817	0.1969	0.1955	0.1969	0.1250
<b>US</b>	0.2619	0.2407	0.1801	0.0996	0.1321	0.0856	0.2619	0.0856
<b>TE</b>	0.1345	0.1578	0.0961	0.1537	0.2350	0.2229	0.2350	0.0961
<b>HO</b>	0.1345	0.1788	0.0899	0.1760	0.2401	0.1807	0.2401	0.0899
<b>FR</b>	0.0993	0.1156	0.0930	0.1843	0.2213	0.2865	0.2865	0.0930
<b>CO</b>	0.3340	0.1993	0.1955	0.0938	0.1079	0.0695	0.3340	0.0695
<b>OM</b>	0.3349	0.1385	0.2293	0.1093	0.1117	0.0763	0.3349	0.0763

Tabla 28. Matriz de decisión transpuesta

Obtenemos una nueva matriz de forma que, cada uno de los términos que la componen, viene de la aplicación de la expresión que sigue:

$$s_{ij} = w_i \frac{(f_i^* - x_{ij})}{(f_i^* - f_i^-)} \quad (22)$$

donde  $w_i$  es el peso global encontrado, para cada sub-factor, mediante la aplicación del método AHP, y que asimismo se ha recogido anteriormente en la tabla 09. Empleamos la expresión anterior y, de la misma, se obtiene la matriz que se recoge en la tabla 29.

	Wc	ESTRATEGIAS					
		ROO	SBI	TER	WOV	WUN	CUT
<b>LA</b>	0.0997	0.0606	0.0824	0.0640	0.0997	0.0849	0.0000
<b>VI</b>	0.0567	0.0383	0.0414	0.0392	0.0567	0.0432	0.0000
<b>AB</b>	0.1032	0.0169	0.0000	0.0576	0.1032	0.0985	0.0570
<b>BI</b>	0.1685	0.0251	0.0649	0.1685	0.0658	0.0000	0.0138
<b>SA</b>	0.2274	0.2274	0.1734	0.1203	0.0481	0.0000	0.0045
<b>US</b>	0.0756	0.0000	0.0091	0.0351	0.0696	0.0556	0.0756
<b>TE</b>	0.0448	0.0324	0.0249	0.0448	0.0262	0.0000	0.0039
<b>HO</b>	0.0361	0.0254	0.0147	0.0361	0.0154	0.0000	0.0143
<b>FR</b>	0.0589	0.0570	0.0520	0.0589	0.0311	0.0198	0.0000
<b>CO</b>	0.0691	0.0000	0.0352	0.0362	0.0627	0.0591	0.0691
<b>OM</b>	0.0600	0.0000	0.0456	0.0245	0.0524	0.0518	0.0600
<b>U = 0.5</b>							
<b>S<sub>i</sub></b>		0.4830	0.5436	0.6853	0.6309	0.4129	0.2982
<b>R<sub>i</sub></b>		0.2274	0.1734	0.1685	0.1032	0.0985	0.0756
<b>Q<sub>i</sub></b>		0.7387	0.6391	0.8060	0.5207	0.2237	0.0000

Tabla 29. Estimación de los valores S<sub>j</sub>, R<sub>j</sub> y Q<sub>j</sub> del método VIKOR

De ello se determina S<sub>j</sub>, lo que se hace para cada estrategia j y para los once sub-criterios tomados, quedando descrita por la expresión, particularizada al caso, que sigue:

$$S_j = \sum_{i=1}^{11} w_i \frac{(f_i^* - x_{ij})}{(f_i^* - f_i^-)} \quad j = 1, 2, \dots, 6 \quad (23)$$

$S_j$  representa la medida de la utilidad que ofrece cada estrategia de restauración.

2.- A continuación, procediendo tal como establece la metodología que estamos aplicando, determinamos  $R_j$ , valor que, para cada estrategia analizada, mide el nivel de desagrado o disgusto que genera la misma. Lo hacemos a partir de la expresión conocida:

$$R_j = \max_i \left\{ w_i \frac{(f_i^* - x_{ij})}{(f_i^* - f_i^-)} \right\} \quad j = 1, 2, \dots, 6; i = 1, 2, \dots, 11 \quad (24)$$

3.- Con todo, se opera de acuerdo con la expresión siguiente, obteniéndose los valores  $Q_j$  recogidos en la tabla 29.

$$Q_j = \nu \frac{(S_j - S^*)}{(S^- - S^*)} + (1 - \nu) \frac{(R_j - R^*)}{(R^- - R^*)} \quad j = 1, 2, \dots, 6 \quad (25)$$

El significado de  $S^*$ ,  $S^-$ ,  $R^*$ , y  $R^-$  es el que se señala seguidamente:

$$\begin{aligned} S^* &= \min_j S_j \\ S^- &= \max_j S_j \\ R^* &= \min_j R_j \\ R^- &= \max_j R_j \end{aligned} \quad (26)$$

Asimismo y como se ha descrito en anterior apartado,  $\nu$  es el peso para la estrategia de máxima utilidad para el grupo y  $1 - \nu$  es el peso del desagrado individual. Puesto que se busca una solución de compromiso desde el consenso general, el valor de  $\nu$  se ha tomado 0.5.

4.- Por último, se tiene la jerarquización de las estrategias de restauración que se recoge en la tabla 30.

<b>Estrategia: ROO SBI TER WOV WUN CUT</b>						
<b>S<sub>i</sub></b>	3	4	6	5	2	1
<b>R<sub>i</sub></b>	6	5	4	3	2	1
<b>Q<sub>i</sub></b>	5	4	6	3	2	1

<b>Posición:</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>S<sub>i</sub></b>	CUT	WUN	ROO	SBI	WOV	TER
<b>R<sub>i</sub></b>	CUT	WUN	WOV	TER	SBI	ROO
<b>Q<sub>i</sub></b>	CUT	WUN	WOV	SBI	ROO	TER

Tabla 30. Priorización de estrategias a partir de S, R y Q (VIKOR)

De la jerarquización comentada se tiene la mejor estrategia de restauración de grandes desmontes existentes, en base al valor de Q, pues se trata de la solución de compromiso por consenso. Ahora bien, para poder afirmar esto mismo, deben satisfacerse las dos condiciones que establece el método VIKOR, las cuales son:

1. Condición de ventaja aceptable: se establece que, para que pueda considerarse una ventaja aceptable entre las dos estrategias de mayor prioridad, debe satisfacerse que  $Q^{(2)} - Q^{(1)} \geq Q^{(j)}$ , donde  $Q^{(2)}$  es la estrategia de restauración en segunda posición en el ranking obtenido para Q,  $Q^{(1)}$  es la primera de ellas y  $Q^{(j)} = 1/(J - 1)$ , donde J es el número de estrategias analizadas, esto es, seis.

En nuestro caso, las estrategias que ocupan la primera y segunda posición del ranking Q son, respectivamente, la estrategia del falso túnel (CUT) y pasos inferiores adaptados para fauna (WUN). Procediendo como se ha descrito, se tiene que se satisface la condición de ventaja necesaria, ya que  $Q(2) - Q(1) = 0.2237 \geq Q(J) = 0.20$ .

2. Condición de estabilidad aceptable: Esta condición exige que la estrategia mejor posicionada, es decir, la primera del ranking, sea también la mejor para los casos de S y R. En nuestro caso, como así se desprende de la tabla 30, queda satisfecha la condición ahora referida.

Con todo, pues, puede decirse que las condiciones establecidas por el método VIKOR son satisfechas por la estrategia de restauración del falso túnel (CUT), por lo que sí es, finalmente, la solución de compromiso buscada.



# **CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES**



El objeto del presente apartado es el de, en base a los resultados obtenidos anteriormente, poder obtener y destacar una serie de conclusiones que aporten nueva luz en los procesos de decisión de las actuaciones de restauración de grandes desmontes de carretera. Por otra parte, se aporta una propuesta de posibles nuevas líneas de investigación de esta temática.

Hoy en día, los requerimientos por parte de muchos estados y entidades supranacionales, como es el caso de la Unión Europea, pasan por la integración de sus redes de transporte terrestre en el esquema de la Infraestructura Verde. Es por ello que esta tesis se ha preocupado de implementar los criterios medioambientales que deben manejarse durante la selección de alternativas de restauración de grandes desmontes de carreteras existentes. Asimismo, ha sido también objeto de la misma el determinar cuál de esas posibles alternativas, agrupadas en lo que hemos dado en llamar como estrategias de restauración y de entre el conjunto de todas ellas, es la de mayor consenso.

Así, el método Delphi se ha empleado, en una primera etapa, para obtener una evaluación exhaustiva tanto de los factores como de las estrategias de restauración comentadas antes. Ello se ha hecho a partir de un panel de doce expertos, los cuales han procedido según las disposiciones del método de expertos referido. Esencialmente, su importante aportación se ha basado en la emisión de juicios comparativos dos a dos entre criterios y alternativas (estas últimas para cada criterio).

Posteriormente, y con la información obtenida, se ha aplicado un método híbrido que combina las técnicas multicriterio AHP y VIKOR, todo lo cual ha permitido obtener los pesos o prioridades de los criterios, así como la jerarquización de las estrategias de restauración manejadas. Vista la perfecta aplicabilidad de los métodos comentados al caso concreto que se ha estudiado, ha de indicarse que su empleo ha resultado muy interesante en tanto ha permitido conocer, con el rigor matemático que se deriva de su uso, los pesos de los factores que intervienen en la selección de las alternativas de restauración de los desmontes de entidad en carreteras ya existentes.

Estos factores así priorizados pueden, en adelante, usarse para la referida selección de alternativas en casos abiertos como el tratado en la presente tesis, sin que necesariamente éstas deban ser únicamente las estrategias de restauración ahora estudiadas. Es decir, la priorización de los criterios o factores que intervienen en estos procesos de selección permite que los mismos puedan ser empleados, por parte de los técnicos que participan en tal proceso de decisión, independientemente de que las alternativas que manejen, fruto de condicionamientos particulares, puedan asemejarse más o menos a las estrategias de restauración analizadas en este trabajo. Esto es posible decirlo en base a la independencia que existe entre niveles de jerarquización en el método AHP, de forma que los criterios no son dependientes de las soluciones concretas que puedan estar en estudio.

Así, el factor relativo a la seguridad vial generada o derivada de la solución de restauración finalmente adoptada ha sido uno de los considerados como principales, de acuerdo con la priorización practicada. Sin embargo, los factores biótico, abiótico y el paisaje, el conjunto de los cuales participa en gran medida en el indicador ambiental, deben localizarse entre los más prioritarios, a la vista de los resultados obtenidos.

Lo anterior se recoge y cuantifica en la figura 23 aportada ahora. De la misma se desprende, como se dice, que en los proyectos de restauración de grandes desmontes de carreteras existentes, los criterios medioambientales deberán ser tenidos muy en cuenta y priorizarse, en consecuencia, sobre otros que tradicionalmente han tenido mucho más peso en los procesos de selección de alternativas.

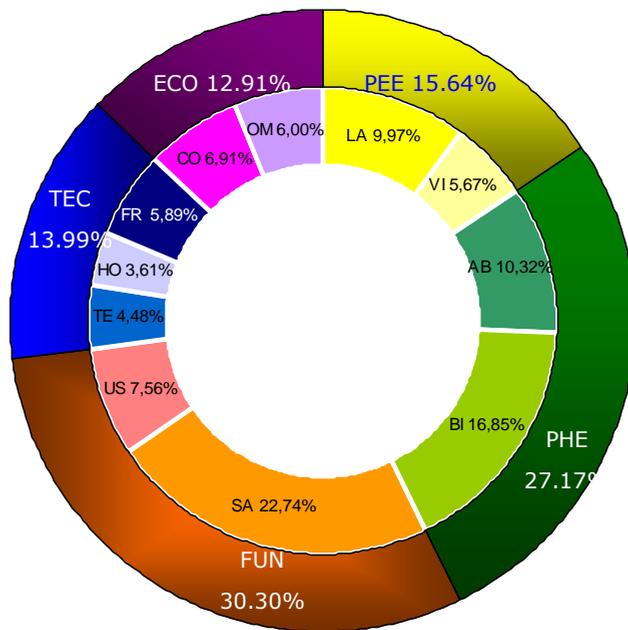


Figura 23. Pesos de los factores que intervienen en la selección de alternativas

Por otra parte, y como se ha comentado, de acuerdo con la rigurosa metodología empleada y en relación con las estrategias de restauración propuestas, es posible concluir que, para una actuación de restauración ajustada al caso general, la opción del falso túnel (CUT) es la de mayor consenso frente al conjunto de las restantes, como así queda recogido en la figura 24.

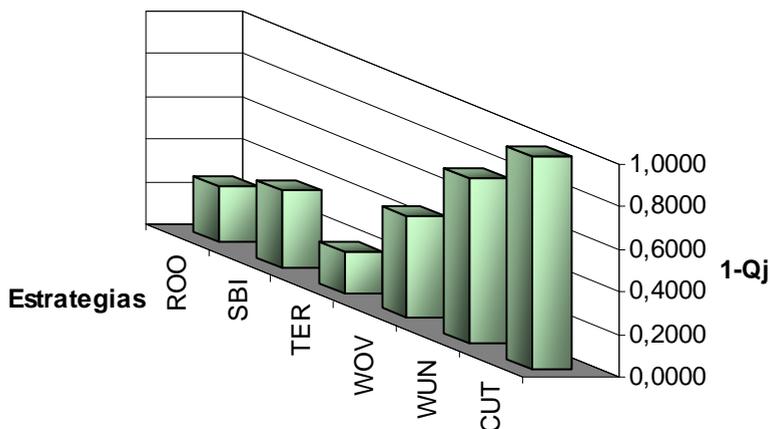


Figura 24. Priorización de las alternativas (salida de resultados VIKOR)

Tras ella, son los pasos inferiores, primero, y los pasos superiores después, y siempre acompañados de sus actuaciones complementarias sobre el impacto paisajístico y visual y otras alteraciones, las estrategias cuya ejecución es preferida. Evidentemente, cuando hablamos de pasos inferiores o superiores, y como se ha comentado a lo largo del documento, se está haciendo referencia a la preferencia sobre las tipologías constructivas que, como no puede ser de otra manera, deberán observar su necesario acondicionamiento particularizado al paso de fauna, de alguna de las maneras en que ello es posible.

El tema objeto de la presente tesis se ha demostrado, tras todo, complejo y abierto. Bien es cierto que, gracias a las herramientas metodológicas empleadas y, por tanto, al rigor que le imprimen al análisis realizado a lo largo de la tesis ahora presentada, ha sido posible extraer una serie de conclusiones novedosas que, se

entiende, aportan información valiosa al proceso de decisión que se practica a la hora de seleccionar las alternativas más adecuadas para la restauración de desmontes en carreteras ya existentes. Pero eso no quita que la complejidad y amplitud a la que se hace referencia hagan dificultoso cualquier enfoque con el que se acometa esta problemática.

En los muchos casos particulares de restauración de grandes desmontes que ya mismo se están planteando, y se plantearán en los próximos años, en las oficinas de planificación territorial de numerosas administraciones locales y entidades de rango administrativo superior, en toda Europa, se habrán constituido y constituirán equipos multidisciplinares los cuales, sin poder contar con un patrón de actuación, dado que no existe tal, intentarán abordar el problema y hallar la solución de restauración más idónea. Es ahí donde el presente trabajo pretende aportar algo de luz. Pero es también ahí donde se gestan las futuras líneas de investigación que deben permitir avanzar más en la búsqueda de criterios más aquilatados y alternativas más acertadas.

Es así que se entiende que una de las grandes líneas a investigar es esa misma que se ha señalado, esto es, la consulta precisa y detallada a esos equipos que ejecutan el Decision Making Process (DCM) en la materia que nos ocupa, a fin de obtener información más certera sobre los aspectos que deben tratarse para, de ello y trabajando adecuadamente esa valiosa información, obtener, mediante la aplicación de modelos como los ahora empleados, resultados y conclusiones que puedan facilitar o, al menos, guiar la evolución de tales procesos. Todo ello contribuiría, sin duda, a aquilatar aún más los pesos de los criterios de selección y, por tanto, a ir aportando una base, más o menos robusta, sobre la que comenzar los difíciles procesos de selección de alternativas a los que nos venimos refiriendo.

Otra de las líneas fundamentales que, al abrigo de estas conclusiones, cabría considerarse para su mayor investigación, es la de profundizar en la configuración de los paquetes de soluciones complementarias encaminadas a la restauración, o estrategias, como así los hemos denominado en la presente tesis. El que las estrategias estén conformadas por unas u otras combinaciones de soluciones concretas ha de influir, necesariamente, en el juicio comparativo que podrán emitir

los posibles expertos consultados. Es así que la mejora de esas combinaciones, bien mediante la búsqueda de otras nuevas o bien a través del mejor encaje de las ya consideradas, puede llevar a afinar más en la tan pretendida búsqueda de las alternativas de mayor consenso. Conocer aquéllas de tales alternativas que generan mayor consenso es, como así subyace en el propio desarrollo de la presente tesis, un aporte fundamental y de gran valor en un tema tan crucial como es el de la restauración de hábitats degradados.

# **CAPÍTULO 6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**



Aghdaie, M.H., Zolfani, S.H., Zavadskas, E.K., 2014. Synergies of data mining and multiple attribute decision making. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 110, 767–776.

Alexander, S.M., Waters, N.M., 2000. The effects of highway transportation corridors on wildlife: a case study of Banff National Park. *Transportation Research Part C-Emerging. Technologies*, 8 (1-6), 307-320.

Antrop, M. 2006. Sustainable landscapes: contradiction, fiction or utopía? *Landscape and Urban Planning*, 75, 3–4, 187–197.

Arce R., 2003. La evaluación de impacto ambiental en la encrucijada. Los retos del futuro. La Ley. Madrid.

Bager, A., Fontoura, V., 2013. Evaluation of the effectiveness of a wildlife roadkill mitigation system in wetland habitat. *Ecological Engineering*, 53, 31-38.

Bascompté, J., Solé, R.V., 1996. Habitat fragmentation and extinction thresholds in spatially explicit models. *Journal of Animal Ecology*, 65, 465-473.

Benitez-López, A., Alkemade, R., Verweij, P.A., 2010. The impacts of roads and other infrastructure on mammal and bird populations: a meta-analysis. *Biological conservation*, 143(6), 1307-1316.

Blignaut, J., Aronson, J., de Groot, R., 2014. Restoration of natural capital: A key strategy on the path to sustainability. *Ecological Engineering*, 65, 54-61.

Blumentrath, C., Tveit M.S., 2014. Visual characteristics of roads: A literature review of people's perception and Norwegian design practice. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 59, 58–71.

Calvi, A., De Blasiis, M.A., Guattari, C., 2012. An empirical study of the effects of road tunnel on driving performance. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 53(3), 1100-1110.

Canto-Perelló, J., Curiel-Esparza, J., 2006. An analysis of utility tunnel viability in urban areas. *Civil Engineering and Environmental Systems*, 23 (1), 11-19.

Canto-Perelló, J., Curiel-Esparza, J., Calvo, V., 2009. Analysing utility tunnels and highway networks coordination dilemma. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24 (2), 185-189.

Canto-Perelló, J., Curiel-Esparza, J., Calvo, V., 2013. Criticality and threat analysis on utility tunnels for planning security policies of utilities in urban underground space. *Expert Systems with Applications*, 40(11), 4707-4714.

Canto- Perelló, J., Martínez-García, M.P., Curiel-Esparza, J., Martín-Utrillas, M., 2015. Implementing sustainability criteria for selecting a roof assembly typology in medium span buildings. *Sustainability*, 7, 6854-6871.

Cely, A., 1999. Metodología de los Escenarios para estudios Prospectivos. *Revista Ingeniería e Investigación*, 44, 26-35.

Clevenger, A.P., Chruszcz, B., Gunson, K.E. 2001. Drainage culverts as habitat linkages and factors affecting passage by mammals. *Journal of Applied Ecology*, 38, 1340-1349.

Costanza, R., 2012. Ecosystem health and ecological engineering. *Ecological Engineering*, 45, 24-29.

Curiel-Esparza, J., Canto-Perelló, J., 2012. Understanding the major drivers for implementation of municipal sustainable policies in underground space. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 19(6), 506-514.

Curiel-Esparza, J., Canto-Perelló, J., 2013. Selecting utilities placement techniques in urban underground engineering. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 13(2), 276-285.

Curiel-Esparza, J., Cuenca-Ruiz, M.A., Martin-Utrillas, M., Canto-Perelló, J., 2014. Selecting a Sustainable Disinfection Technique for Wastewater Reuse Projects. *Water*, 6(9), 2732-2747.

Curiel-Esparza, J., 2015. Integrating climate change criteria in reforestation projects using a hybrid decision-support system. *Environmental Research Letters*, 10, 094022.

Dalkey, N.C., 1969. The Delphi method: an experimental study of group opinion. RAND Corporation, RM-5888-PR, USA.

Dalkey, N.C., Brown B., S. Cochran S., 1970. The Delphi Method, III: Use of self rating to improve group estimates. *Technological Forecasting and Social Change*, 1, 283-91.

Dong, Y., Zhang, G., Hong, W., Xu, Y., 2010. Consensus models for AHP group decision making under geometric mean prioritization method, *Decision Support Systems*, 49(3), 281-289.

Dong, Z., Wang, Z., Liu, D., Li, L., Ren, C., Tang, X., Jia, M., Liu, C., 2013. Assessment of habitat suitability for waterbirds in the West Songnen Plain, China, using remote sensing and GIS. *Ecological Engineering*, 55, 94-100.

Dumbrovský, M., Sobotková, V., Šarapatka, B., Chlubnac, L., Váchalová, R., 2014. Cost-effectiveness evaluation of model design variants of broad-base terrace in soil erosion control. *Ecological Engineering*, 68, 260-269.

Duckstein, L., Opricovic, S., 1980. Multiobjective Optimization in River Basin Development. *Water Resources Research*, 16(1), 14-20.

EEA/FOEN European Environmental Agency 2011. Landscape Fragmentation in Europe. EEA Report, 2-2011 (file:///C:/Users /Administrador/Downloads/Landscape %20fragmentation %20in%20Europe.pdf)

EUCON Council of Europe 2000. European Landscape Convention adopted by the Committee of Ministers of the Council of Europe on 19 July 2000 and opened for signature by its Member States in Florence on 20 October 2000. (<http://conventions.coe.int/Treaty/en/Treaties/Html/176.htm>)

EUCOM European Commission 2013. Building a Green Infrastructure for Europe ([http://ec.europa.eu/environment/nature/ecosystems/docs/green\\_infrastructure\\_broc.pdf](http://ec.europa.eu/environment/nature/ecosystems/docs/green_infrastructure_broc.pdf))

UN United Nations 1992 CBD-CONVENTION ON BIOLOGICAL DIVERSITY (<https://www.cbd.int/convention/text/>)

EUPAR European Parliament 2012. European Parliament resolution of 20 April 2012 on our life insurance, our natural capital: an EU biodiversity strategy to 2020 (2011/2307(INI)) ([http://ec.europa.eu/environment/nature/biodiversity/comm2006/pdf/EP\\_resolution\\_april2012.pdf](http://ec.europa.eu/environment/nature/biodiversity/comm2006/pdf/EP_resolution_april2012.pdf))

Fahrig, L. 2002. Effect of habitat fragmentation on the extinction threshold: A synthesis. *Ecological Applications*, 12, 346-353.

Fahrig, L. 2003. Effect of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, 34, 487-515.

Forman, E., Peniwati, K., 1998. Aggregating individual judgments and priorities with the Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research*, 108, 165-169.

Forman, R.T.T., L.E. Alexander. 1998. Roads and their major ecological effects. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 29, 207-231.

Forman, R.T.T., R.D. Deblinger. 2000. The ecological road-effect zone of a Massachusetts (USA) suburban highway. *Conservation Biology*, 14, 36-46.

Forman, R.T.T., Sperling, D., 2011. The Future of Roads: No Driving, No Emissions, *Nature Reconnected. Solutions Journal*, 2(5), 10-23.

Fu, R., Guo, Y., Yuan, W., Feng, H., Ma, Y., 2011. The correlation between gradients of descending roads and accidents rates. *Safety Science*, 49(3), 416-423.

Garg, A., Garg, A., Tai, K., Sreedeeep, S., 2014. Estimation of factor of safety of rooted slope using an evolutionary approach. *Ecological Engineering*, 64, 314-324.

Girald, L.F., Torre, C.M., 2012. The use of AHP in a multiactor evaluation for urban development programs: a case study. *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2012 Lecture Notes in Computer Science 7334*, 157-167.

Godet, M., 2007. *Prospectiva Estratégica: problemas y métodos*. CNAM. cuaderno de Lipsor, 20. Paris.

Golub, G., van Loan, C., 1996. *Matriz computations*. John Hopkins Press, Ltd. London.

Gómez Orea, D., 2002. *Evaluación de impacto ambiental*. Ed. MUNDI-PRENSA LIBROS. Madrid.

GVA, Generalitat Valenciana, 2012. *Guía Metodológica. Estudios de Paisaje*. (<http://www.upv.es/contenidos/CAMUNISO/info/U0670136.pdf>)

GVA, Generalitat Valenciana, 2014. Ley 5/2014, de 25 de julio, de Ordenación del Territorio, Urbanismo y Paisaje, de la Comunitat Valenciana. (<http://boe.es>)

Han, J.G., Lee, J.Y., Lee, M.H., 2008. Determination of cut slope reinforcement using AHP technique. Proceedings of the 4th Asian Regional Conference on Geosynthetics, Shanghai, China, 244-248.

Hayati, E., Abdi, E., Majnounian, B., Makhdom M., 2013. Application of sensitivity analysis in Forest Road networks planning and assessment. J. Journal of Agricultural Science and Technology, 15(4), 781-792.

Herranz-Pascual, M., Eguiguren-García, J., Proy-Rodríguez, R., Cuadrado-Rojo, J., 2013. New tools to support decision making in urban planning model of sustainability assessment of municipal action plans. Dyna, 88(4), 462-472.

Hervás, I., Suárez, F., Mata, C., Herranz, J., Malo, J.E., 2006. Pasos de fauna para vertebrados. Minimización y seguimiento del efecto barrera de las vías de comunicación. CEDEX, Secretaría General Técnica, Ministerio de Fomento. Madrid.

Hu, S.N., Fan, Q.D., Hu, Z.H., Xiao, XH., 2012. Applications of visual characteristics in highway alignment landscape design. Advanced Materials Research, 598, 260-263.

Hunt, D.V.L., Rogers, C.D.F., 2014. A benchmarking system for domestic water use. Sustainability, 6, 2993-3018.

Hunt D.V.L., Nash, D., Rogers, C., 2014. Sustainable utility placement via Multi-Utility Tunnels. Tunnelling and Underground Space Technology, 39,15-26.

Ibáñez, R., 2011. La cuarta dimensión. ¿es nuestro universo la sombra de otro? RBA. Barcelona.

IENE - Infra Eco Network Europe Steering Committee, 2013. From providing single fauna passages to reconciling green and transport infrastructure in europe. Technical meeting of the working group Habitat fragmentation caused

by transport infrastructure. Ecological connectivity and transport routes. Cáceres, 2013. Ministry for Agriculture, Food and Environmental Affairs.

Iuell, B., Bekker, G.J., Cuperus, R., Dufek, J., Fry, G., Hicks, C., Hlavac, V., Keller, B., B., Rosell, C., Sangwine, T., Torslov, N., Wandall, B.M., (Eds) 2003. Habitat Fragmentation due to Transportation Infrastructure. Wildlife and traffic: A European Handbook for Identifying Conflicts and Designing Solutions. European Co-operation in the Field of Scientific and Technical Research (COST), Brussels.

Jaeger A.G., 2000. Landscape division, splitting index, and effective mesh size: new measures of landscape fragmentation. *Landscape Ecology*, 15(2), 115-130.

Kukut, V., Zavadskas, E. K., Lazauskas, M., 2014. Assessment of priority alternatives for preservation of historic buildings using model based on ARAS and AHP methods. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 14(2), 287-294.

Lindenmayer, D.B., Cunningham, R.B., Pope M.L., 1999. A large-scale 'experiment' to examine the effects of landscape context and habitat fragmentation on mammals. *Biological Conservation*, 88, 387-403.

Liu, S.L., Cui, B.S., Dong, S.K., Yang, Z.F., Yang, M., Holt, K., 2008. Evaluating the influence of road networks on landscape and regional ecological risk – A case study in Lacang River Valley of Southwest China. *Ecological Engineering*, 34(2), 91-99.

Lodé, T., 2000. Effect of a motorway on mortality and isolation of wildlife populations. *Ambio*, 29, 163-166.

Marjanovic, M., Kovacevic, M., Bajat, B., Mihalic, S., Abolmasov, B., 2011. Landslide assessment of the Starca Basin (Croatia) using machine learning algorithms. *ActaGeotechnical Slovenica*, 2, 45-55.

Martin-Utrillas, M., Reyes-Medina, M., Curiel-Esparza, J., Canto-Perello, J., 2015a. Hybrid method for selection of the optimal process of leachate treatment in waste treatment and valorization plants or landfills. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 17, 873-885.

Martin-Utrillas, M., Juan-Garcia, F., Canto-Perello, J., Curiel-Esparza, J., 2015b. Optimal infrastructure selection to boost regional sustainable economy. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 22, 30-38.

Martin-Utrillas, M., Azorin-Carrion A., Canto-Perelló J., Curiel-Esparza J., 2015c. Multi-criteria decision-making model for establishing the optimal typology for clinker storage silos. *ZKG International*, 1-2, 50-58.

Mata, C., Hervás, I., Herranz, J., Suárez, F., Malo, J.E., 2005. Complementary use by vertebrates of crossing structures along a fenced Spanish motorway. *Biological Conservation*, 124, 397-405.

Mata, C., Hervás, I., Herranz, J., Suárez, F., Malo, J.E., 2008. Are motorway wildlife passages worth building? Vertebrate use of road-crossing structures on a Spanish motorway. *Journal of Environmental Management*, 88(3), 407-415.

Meirelles, S.T., Pivello, V.R., Joly, C.A., 1999. The vegetation of granite rock outcrops in Rio de Janeiro, Brazil, and the need for its protection. *Environmental Conservation*, 1, 10-20.

Méndez, M., 2008. Algoritmos evolutivos y preferencias del decisor aplicados a problemas de optimización multiobjetivo discretos. Tesis doctoral (<http://acceda.ulpgc.es>).

McGarigal, K., Cushman, S.A., 2002. Comparative evaluation of experimental approaches to the study of Habitat Fragmentation Effects. *Ecological Applications*, 12, 335-345.

MFO Ministerio de Fomento de España, 2006. Guía para el proyecto y la ejecución de muros de escollera en obras de carretera (<http://www.fomento.es>).

MFO Ministerio de Fomento de España, 2009. Pliego de Prescripciones Técnicas para la Redacción del Estudio Informativo. Criterios de Valoración. Autovía del Norte A-1. Tramo Burgos-Miranda de Ebro. (<https://contrataciondelestado.es>)

MMA Ministerio del Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2010. Indicadores de fragmentación de hábitats causada por infraestructuras lineales de transporte. Documentos para la reducción de la fragmentación de hábitats causada por infraestructuras lineales de transporte, número 4. O. A. Parques Nacionales. Ministerio del Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Madrid.

Moreno-de las Heras, M., Díaz-Sierra, R., Nicolau, J.M., Zavala, M.A., 2011. Evaluating restoration of man-made slopes: a threshold approach balancing vegetation and rill erosion. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36(10), 1367-1377.

Naddeo, V., Belgiorno, V., Zarra, T., Scannapieco, D., 2013. Dynamic and embedded evaluation procedure for strategic environmental assessment. *Land use policy* 31, 605-612.

Ng, S.J., Dole, J.W., Sauvajot, R.M., Riley, S.P.D., Valone, T.J., 2004. Use of highway undercrossings by wildlife in southern California. *Biological Conservation*, 115(3), 499-507.

NTJ 12S Parte 2, 2013. Obras de bioingeniería: Técnicas de estabilización de taludes Código: NTJ E 12S P2 Rev. COITAC.

- Olaf H., 1967. Analysis of the future: the Delphi method. RAND Corporation, P-3558, USA.
- Olsson, M.P.O., Widén, P., Larkin, J.L., 2008. Effectiveness of a highway overpass to promote landscape connectivity and movement of moose and roe deer in Sweden. *Landscape and Urban Planning*, 85( 2), 133-139.
- Opricovic, S., Tzeng, G. H. (2004) The Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research*, 156 (2), 445-455.
- Park, S., Jeon, S., Him, S., Choi C., 2011. Prediction and comparison of urban growth by land suitability index mapping using GIS and RS in South Korea. *Landscape and Urban Planning*, 99(2), 104-114.
- Picó, F.X., Quintana-Ascencio, P. F., 2005. Análisis de factores demográficos y genéticos para la conservación de poblaciones de plantas en un hábitat fragmentado. *Ecosistemas*, 14(2), 109-115.
- Ramajo, L., Giradles, J.V., 2014. Manual de técnicas de estabilización biotécnica en taludes de infraestructuras de obra civil. Consejería Fomento y Vivienda. Junta de Andalucía.
- van der Ree. R. y Smith D.J., Grilo, C. 2015. Handbook of Road Ecology. Wiley & Sons, Ltd, UK.
- Robinson, G.R., Holt, R.D., Gaines, M.S., Hamburg, S.P., Johnson, M.L., Fitch, H.S., Martinko, E.A., 1992. Diverse and contrasting effects of habitat fragmentation. *Science*, 257, 524-526.
- Rodríguez, J.J., García de la Morena, E., González, D., 2008. Estudio de las medidas correctoras para reducir las colisiones de aves con ferrocarriles de alta velocidad. Ministerio de Fomento. CEDEX. Madrid.

Saaty, T.L., 1980. *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill. New York.

Saaty, T.L., 1986. Axiomatic foundations of the AHP. *Management Science*, 32, 841-855.

Saaty, T.L., 2012. *Decision making for leaders. The Analytic Hierarchy Process for decisions in a complex world*. RWS Publications. Pittsburgh.

Sadeghi-Niaraki, A., Kim, K., Varshosaz, M., 2010. Multi-Criteria Decision-based Model for Road Network. *International Journal of Environmental Research*, 4(4), 573-582.

Sayadi, M.K., 2009. Extension of VIKOR method for decision making problem with interval numbers. *Applied Mathematical Modelling*, 33, 2257-2262.

Shapira, A., Shosany, M., Nir-Goldenberg, S., 2013. Combining analytical hierarchy process and agglomerative hierarchical clustering in search of expert consensus in Green Corridors development management. *Environmental Management*, 52(1), 123-135.

Sorolla, A., Solina, J., 2013. Structures to increase the permeability of roads on wildlife corridors in Catalonia. Technical sessions of the working group Habitat fragmentation caused by transport infrastructure. Ecological connectivity and transport routes. Cáceres, 2013. Ministry for Agriculture, Food and Environmental Affairs.

Tellería, J.L., Díaz, J.A., Pérez-Tris, J., Santos, T., 2011. Fragmentación de hábitat y biodiversidad en las mesetas ibéricas: una perspectiva a largo plazo. *Ecosistemas*, 20(2), 79-90.

Tiktin, J., 1998. *Medidas correctoras del Impacto Ambiental en las infraestructuras lineales*. E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid.

Tzoulas, K., Korpela, K., Venn, S., Yli-Pelkonen, V., Kaźmierczak, A., Niemela, J., James, P., 2007. Promoting Ecosystem and Human Health in Urban Areas using Green Infrastructure: A Literature Review. *Landscape and Urban Planning*, 81(3), 167-178.

Valdivia, M., 1985. *Análisis matemático V*, tomo 1. UNED. Madrid.

Valladares, F., Balaguer, L., Mola, I., Escudero, A., Alfaya, V., 2011. Restauración ecológica de áreas afectadas por infraestructuras de transporte. Bases científicas para soluciones técnicas. Fundación Biodiversidad. Madrid, España.

Vargas, 2010. Using the Analytic Hierarchy Process (AHP) to select and prioritize projects in a portfolio. PMI Global Congress 2010 – North America. Washington DC, USA.

Villalva, P., Retob, D., Santos-Reis, M., Revilla, E., Grilo, C., 2013. Do dry ledges reduce the barrier effect of roads? *Ecological engineering*, 57, 143-148.

Wang, H., Shen, Q., Tang, B., Skitmore, M., 2013. An integrated approach to supporting land-use decisions in site redevelopment for urban renewal in Hong Kong. *Habitat International*, 38, 70-80.

Yu, D., Xun, B., Shi, P., Shao, H., Liu, Y., 2012. Ecological restoration planning based on connectivity in a urban area. *Ecological Engineering*, 46, 24-33.

Zolfani S.H., Aghdaie, M.H., Derakhti, A., Zavadskas, E.K., Hossein, M., Varzandeh, M., 2013. Decision making on business issues with foresight perspective; an application of new hybrid MCDM model in shopping mall locating. *Expert Systems With Applications*, 40(17), 7111-7121.

## **CAPÍTULO 7 ANEXO**



**Anexo de tablas del Capítulo 4:  
tablas de agregación AIJ y matrices  
de comparación por pares de las  
estrategias de restauración, para  
cada sub-factor**



Comparación por pares			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Media geométrica
ROO	vs.	SBI	1	4	1	3	2	1	1/2	1/2	5	1	1	2	1.41
ROO	vs.	TER	1/2	3	1/5	1	1/2	1/2	1/4	2	5	1/2	1	1	0.82
ROO	vs.	WOV	1/4	3	1/4	5	3	5	1/4	5	5	1/4	2	3	1.50
ROO	vs.	WUN	1/6	3	1/8	7	1	3	1	4	5	1/6	1	2	1.20
ROO	vs.	CUT	1/7	1/3	1/8	9	2	2	1/2	3	3	1/7	1/2	1/5	0.70
SBI	vs.	TER	1/2	1	1	1/3	3	1/2	1/2	3	1/2	1/2	1	2	0.87
SBI	vs.	WOV	1/4	2	1/7	3	4	5	1/4	6	2	1/4	2	1	1.17
SBI	vs.	WUN	1/3	2	1/7	5	4	4	1/4	5	2	1/3	1	1	1.17
SBI	vs.	CUT	1/6	1/4	1/7	7	5	2	1/4	3	1/3	1/6	1/2	1/5	0.59
TER	vs.	WOV	1/3	3	1/4	1	3	6	1/2	4	3	1/3	1	2	1.27
TER	vs.	WUN	1/3	3	1/5	5	1	4	1/2	3	3	1/3	1/2	2	1.16
TER	vs.	CUT	1/5	1/4	1/7	9	3	2	1/2	2	1/3	1/5	1/2	1/6	0.60
WOV	vs.	WUN	2	1/2	1/3	3	1	1/3	2	1/2	1/3	2	1/2	1/3	0.76
WOV	vs.	CUT	1/2	1/3	1/7	5	1	1/4	2	1/3	1/3	1/2	1/2	1/4	0.52
WUN	vs.	CUT	1/4	1/3	1/2	3	2	1/2	1	1/2	1/3	1/4	1/2	1/5	0.53

Tabla 12. Agregación de los juicios comparativos entre estrategias de restauración para el sub-criterio imp. paisajístico (LA).

													Tesis Doctoral		
<b>Comparación por pares</b>			<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>Media geométrica</b>
ROO	vs.	SBI	1/3	1/2	1	3	2	1	1	1/2	5	1/3	1/2	1	0.93
ROO	vs.	TER	1/5	2	1/3	1	4	1/2	2	2	3	1/5	1/2	3	1.00
ROO	vs.	WOV	1/8	3	1/5	5	6	1/6	8	5	3	1/8	2	4	1.37
ROO	vs.	WUN	1/6	3	1/5	7	2	1/4	8	4	1/2	1/6	2	2	1.12
ROO	vs.	CUT	1/9	1/4	1/5	9	5	1/2	8	3	1/2	1/9	1/2	1/5	0.71
SBI	vs.	TER	1/3	2	1/5	1/3	3	1/2	6	3	1/3	1/3	1/2	1	0.80
SBI	vs.	WOV	1/6	2	1/6	3	6	1/6	6	6	1	1/6	2	3	1.16
SBI	vs.	WUN	1/5	2	1/7	5	3	1/4	6	5	1/3	1/5	2	3	1.08
SBI	vs.	CUT	1/9	1/3	1/8	7	5	1/2	6	3	1/3	1/9	1/2	1/2	0.70
TER	vs.	WOV	1/5	2	1/5	5	2	1/4	2	4	3	1/5	3	2	1.16
TER	vs.	WUN	1/3	2	1/6	7	1	1/3	2	3	1/2	1/3	3	1	0.98
TER	vs.	CUT	1/8	1/3	1/7	9	3	1/2	2	2	1/2	1/8	1/2	1/2	0.64
WOV	vs.	WUN	4	1/2	1/3	3	1/3	1/2	1	1/2	1/5	4	1/3	1/3	0.70
WOV	vs.	CUT	1/4	1/2	1/4	5	1	1/3	1	1/3	1/3	1/4	1/4	1/5	0.45
WUN	vs.	CUT	1/5	1/2	1/4	3	3	1	2	1/2	1/3	1/5	1/4	1/5	0.55

Tabla 13. Agregación de los juicios comparativos entre estrategias de restauración para el sub-criterio imp. visual (VI)

													Tesis Doctoral		
<b>Comparación por pares</b>			<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>Media geométrica</b>
ROO	vs.	SBI	1/3	1	1	3	1/2	3	1/2	1/2	2	2	1	2	1.10
ROO	vs.	TER	1/4	2	1/3	1	2	2	1	2	2	3	2	2	1.33
ROO	vs.	WOV	2	3	2	5	1/4	6	1/2	5	2	4	2	2	2.10
ROO	vs.	WUN	3	1	1	7	2	8	1/2	4	1/2	4	2	2	2.05
ROO	vs.	CUT	1/4	1/2	1	9	1/2	4	1/2	3	1/2	6	1	1/3	1.11
SBI	vs.	TER	1/2	2	2	1/3	4	1/2	4	3	1/3	2	2	3	1.41
SBI	vs.	WOV	2	3	3	3	3	5	4	6	2	2	2	3	2.97
SBI	vs.	WUN	2	1	3	5	5	4	4	5	1/3	2	2	2	2.37
SBI	vs.	CUT	1/3	1/4	3	7	3	2	4	3	1/3	4	1	1/4	1.37
TER	vs.	WOV	2	1	3	5	1/4	6	2	4	2	2	1/2	1/2	1.63
TER	vs.	WUN	3	1/3	2	7	1/2	5	2	3	1/2	2	1/2	1/4	1.31
TER	vs.	CUT	1/3	1/3	2	9	1/2	4	2	2	1/2	3	1/2	1/4	1.10
WOV	vs.	WUN	3	1/3	1	3	4	2	1	1/2	1/3	1	1	1/4	1.00
WOV	vs.	CUT	1/2	1/3	1	5	3	1/4	1	1/3	1/2	1	1	1/5	0.72
WUN	vs.	CUT	1/4	1/2	1	3	1/2	1/4	1/2	1/2	2	1	1	1/3	0.67

Tabla 14. Agregación de los juicios comparativos entre estrategias de restauración para el sub-criterio medio abiótico (AB)

Comparación por pares			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Media geométrica
ROO	vs.	SBI	1	2	1	3	3	1	1	2	2	3	1	1	1.57
ROO	vs.	TER	1/2	2	1	1	1	1	3	3	1	3	3	1	1.44
ROO	vs.	WOV	1/4	1/3	1/2	5	1/4	1	1/4	5	3	4	2	1/4	0.92
ROO	vs.	WUN	1/3	1/3	1/2	7	1/2	1/2	1/4	6	1/3	4	2	1/3	0.84
ROO	vs.	CUT	1/4	1/3	1/2	9	1/2	2	1/4	4	1/3	4	2	1/7	0.85
SBI	vs.	TER	1/2	1	1	1/3	3	1	3	2	1/2	3	3	2	1.32
SBI	vs.	WOV	1/4	1/3	1/3	3	1/2	1/4	2	5	2	3	2	1/2	0.96
SBI	vs.	WUN	1/3	1/3	1/4	5	1/2	1/2	2	4	1/3	3	2	1/2	0.90
SBI	vs.	CUT	1/4	1/2	1/4	7	1/2	2	2	3	2	4	2	1/2	1.22
TER	vs.	WOV	1/3	1/2	1/2	5	1/4	1	1/4	4	3	2	1/2	1/3	0.83
TER	vs.	WUN	1/2	1/2	1/3	7	1/3	1/2	1/4	3	1/2	2	1/2	1/4	0.68
TER	vs.	CUT	1/3	1/3	1/5	9	1/3	1	1/4	2	1/2	3	1/2	1/3	0.67
WOV	vs.	WUN	2	1/2	1/3	3	3	1/2	2	1/2	1/3	1	1	1/4	0.84
WOV	vs.	CUT	1/2	1/2	1/4	5	3	3	1	1/3	1/2	1	1	1/4	0.84
WUN	vs.	CUT	1/3	2	1/5	3	2	1	1/2	1/2	1	1	1	3	0.96

Tabla 15. Agregación de los juicios comparativos entre estrategias de restauración para el sub-criterio medio biótico (BI)

Comparación por pares			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Media geométrica
ROO	vs.	SBI	1	1/2	1	3	1	1	1/2	2	4	1	1/3	1/4	0.94
ROO	vs.	TER	1	1/2	1/3	1	1	1	1/2	3	1/2	1	1/3	1/4	0.68
ROO	vs.	WOV	2	1/2	1/6	5	2	1/7	1/4	4	2	1/2	1/2	1/4	0.75
ROO	vs.	WUN	1	1/3	1/6	7	2	1/4	1/4	5	1/3	1/3	1/2	1/4	0.62
ROO	vs.	CUT	2	1/3	1/8	9	2	1/4	1/4	6	1/3	1/4	1/2	1/4	0.65
SBI	vs.	TER	1	2	1/3	1/3	1	1	1/2	2	1/5	1	1	3	0.85
SBI	vs.	WOV	2	1/2	1/6	5	2	1/7	1/2	3	2	1/2	2	1/3	0.89
SBI	vs.	WUN	1	1/2	1/6	7	2	1/4	1/2	5	1/3	1/3	1	1/5	0.71
SBI	vs.	CUT	2	1/3	1/8	9	2	1/4	1/2	4	1/3	1/4	1	1/2	0.75
TER	vs.	WOV	2	1/2	1/2	5	4	1/7	1/4	2	2	1/2	1	1/3	0.89
TER	vs.	WUN	1	1/3	1/4	7	4	1/4	1/4	4	1/3	1/2	1/2	1/3	0.71
TER	vs.	CUT	2	1/2	1/6	9	4	1/4	1/4	3	1/3	1/3	1	1/4	0.75
WOV	vs.	WUN	1/2	1	1/2	3	1	4	1/2	3	1/3	1	1/2	1/2	0.92
WOV	vs.	CUT	1	1	1/5	5	2	4	1	2	1/3	1	1	1	1.15
WUN	vs.	CUT	1/2	1	1/5	3	2	1	2	1/2	1/2	1/2	2	1/2	0.85

Tabla 16. Agregación de los juicios comparativos entre estrategias de restauración para el sub-criterio seguridad vial (SA)

Comparación por pares			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Media geométrica
ROO	vs.	SBI	1	1/2	1	3	1	1	6	2	1	2	2	1	1.43
ROO	vs.	TER	2	1	1	1	4	1	6	3	1	3	1	1/2	1.57
ROO	vs.	WOV	4	1/2	3	5	2	4	8	4	1	4	1	1/2	2.23
ROO	vs.	WUN	1/3	1/2	3	7	2	3	8	5	1/5	4	1	1/2	1.62
ROO	vs.	CUT	5	1/2	5	9	2	4	8	6	2	6	1	1	2.99
SBI	vs.	TER	2	1	1	1/3	5	1	6	2	1	2	2	1/2	1.44
SBI	vs.	WOV	3	1/2	3	3	6	4	6	3	1	3	2	1	2.39
SBI	vs.	WUN	1/3	2	3	5	6	3	6	4	1/5	3	2	1	2.04
SBI	vs.	CUT	4	1	5	7	6	4	6	5	2	5	2	1/3	3.06
TER	vs.	WOV	2	1	2	5	2	4	2	2	1	3	1	2	1.99
TER	vs.	WUN	1/3	1/2	3	7	2	3	2	3	1/5	3	1	1/3	1.31
TER	vs.	CUT	2	1/2	5	9	2	4	2	4	2	5	1	1	2.35
WOV	vs.	WUN	1/3	1	1	3	1/2	1/2	1	2	1/5	1/2	1	1	0.78
WOV	vs.	CUT	1/4	1/2	3	5	1/2	1	1	3	2	1	1	1/3	1.05
WUN	vs.	CUT	4	1/2	4	3	1	1/2	1	2	5	1	1	1/2	1.41

Tabla 17. Agregación de los juicios comparativos entre estrategias de restauración para el sub-criterio afecç, usuarios (US)

Comparación por pares			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Media geométrica
ROO	vs.	SBI	1	1/3	1	1/9	1	1	3	1/4	1	1	1	1	0.74
ROO	vs.	TER	1	2	1	1	1	3	3	2	1	1	2	2	1.51
ROO	vs.	WOV	2	2	1/4	1/5	1	1/4	3	3	1/5	1	2	2	0.92
ROO	vs.	WUN	2	2	1/5	1/3	1	1/4	3	1/4	1/5	1/3	2	1	0.66
ROO	vs.	CUT	2	1/2	1/5	1/7	1	1/3	3	1/3	1/5	1/3	2	1/3	0.52
SBI	vs.	TER	1	2	1	9	1	3	1	3	1	1	2	1	1.62
SBI	vs.	WOV	2	2	1/3	5	1	1/4	1/4	4	1/5	1	2	2	1.02
SBI	vs.	WUN	2	1/2	1/4	7	1	1/4	1/4	1/3	1/5	1/3	2	1	0.64
SBI	vs.	CUT	2	2	1/5	3	1	1/3	1/4	1/2	1/5	1/3	2	1/2	0.66
TER	vs.	WOV	2	1	1/3	1/5	1	1/4	1/4	2	1/5	1	1	2	0.66
TER	vs.	WUN	2	1/2	1/4	1/3	1	1/4	1/4	1/5	1/5	1/2	1	1/3	0.42
TER	vs.	CUT	2	1/2	1/5	1/7	1	1/2	1/5	1/4	1/5	1/2	1	1/2	0.43
WOV	vs.	WUN	1	1	1/3	1	1	1	1	1/6	1/2	1/2	1	1/2	0.66
WOV	vs.	CUT	1	1	1/4	1/2	1	6	2	1/5	1/2	1/2	1	1/2	0.76
WUN	vs.	CUT	1	2	1/4	2	1	5	2	2	1/2	1	1	1	1.21

Tabla 18. Agregación de los juicios comparativos entre estrategias de restauración para el sub-criterio coord. planto. (TE)

Comparación por pares			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Media geométrica
ROO	vs.	SBI	1	1/2	1	1/9	1	1	1	1	1/2	1	1	1	0.74
ROO	vs.	TER	2	3	1	1	1	3	1	2	1	1	2	4	1.60
ROO	vs.	WOV	1/2	2	1/3	1/5	1/2	1/4	6	1/3	1/2	1/3	2	4	0.73
ROO	vs.	WUN	1/3	1	1/4	1/3	1/2	1/6	4	1/5	1/2	1/3	2	3	0.59
ROO	vs.	CUT	1/2	1	1/5	1/7	1/2	1/7	5	1/4	1/2	4	2	3	0.71
SBI	vs.	TER	2	3	1	9	1	3	3	2	2	1	2	2	2.11
SBI	vs.	WOV	1/2	2	1/3	5	1/2	1/4	4	1/3	1/2	1/3	2	2	0.87
SBI	vs.	WUN	1/3	1	1/4	7	1/2	1/6	2	1/5	1/2	1/3	2	2	0.70
SBI	vs.	CUT	1/2	2	1/5	3	1/2	2	4	1/4	1/2	4	2	2	1.14
TER	vs.	WOV	1/3	1	1/3	1/5	1/2	1/6	4	1/3	1/2	1/2	1	2	0.57
TER	vs.	WUN	1/4	1/3	1/4	1/3	1/2	1/6	2	1/5	1/2	1/2	1/2	1/2	0.40
TER	vs.	CUT	1/3	1/4	1/5	1/7	1/2	1/3	2	1/4	1/2	3	1	1/2	0.48
WOV	vs.	WUN	1	1/3	1/2	3	1	1/2	2	1/3	1/2	1	1/2	1/2	0.72
WOV	vs.	CUT	1	1/2	1/3	1/3	1	3	2	1/2	1/2	3	1	1	0.89
WUN	vs.	CUT	1	1	1/4	1	1	4	4	2	2	3	2	1/2	1.38

Tabla 19. Agregación de los juicios comparativos entre estrategias de restauración para el sub-criterio ocup. en planta (HO)

Comparación por pares			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Media geométrica
ROO	vs.	SBI	1	3	1	1/9	1	2	1	1	1	1	1	2	1.02
ROO	vs.	TER	1	2	1	1	1	2	1	1/2	1	1	1	2	1.12
ROO	vs.	WOV	1/4	1/3	1/7	1/5	1/2	6	1/6	2	1/2	1/2	1/2	1	0.51
ROO	vs.	WUN	1/3	1/4	1/8	1/3	1/2	4	1/6	1/4	1/2	1/2	1/2	1/2	0.40
ROO	vs.	CUT	1/4	1/4	1/9	1/7	1/2	4	1/6	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	0.32
SBI	vs.	TER	1	1/2	1	9	1	1	2	1	1	1	1	1	1.20
SBI	vs.	WOV	1/4	1/3	1/7	5	1/2	5	1/6	2	1/2	1/2	1/2	1/3	0.60
SBI	vs.	WUN	1/3	1/4	1/8	7	1/2	3	1/6	3	1/2	1/2	1/2	1/2	0.62
SBI	vs.	CUT	1/4	1/4	1/9	3	1/2	4	1/6	1/3	1/3	1/3	1/3	1/2	0.43
TER	vs.	WOV	1/4	1/3	1/7	1/5	1/2	6	1/6	3	1/2	1/2	1/2	1/2	0.50
TER	vs.	WUN	1/3	1/4	1/8	1/3	1/2	2	1/6	1	1/2	1/2	1/2	1/3	0.41
TER	vs.	CUT	1/4	1/4	1/9	1/7	1/2	4	1/6	1/2	1/3	1/3	1/3	1/2	0.35
WOV	vs.	WUN	2	1	1/5	3	1	1/4	1/2	1/5	1	1	2	2	0.84
WOV	vs.	CUT	1	1/2	1/6	1/3	1	3	1	1/4	1/3	1	1/2	1/3	0.57
WUN	vs.	CUT	1/2	2	1/4	1	1	2	2	1	1/3	1/2	1/2	1	0.81

Tabla 20. Agregación de los juicios comparativos entre estrategias de restauración para el sub-criterio fragmentación (FR)

Comparación por pares			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Media geométrica
ROO	vs.	SBI	1	4	1	3	2	4	4	3	1/2	2	1	5	2.06
ROO	vs.	TER	3	3	1	1	1	2	4	2	1/2	3	2	2	1.76
ROO	vs.	WOV	5	3	2	5	1/2	8	8	4	2	5	3	3	3.31
ROO	vs.	WUN	4	3	2	7	1/2	6	8	5	2	4	3	2	3.15
ROO	vs.	CUT	5	4	2	9	1/2	9	8	6	2	7	4	5	4.09
SBI	vs.	TER	3	1/3	1	1/3	1/2	1/2	2	1/2	1/2	2	2	1/4	0.77
SBI	vs.	WOV	5	1	2	3	2	6	8	2	2	3	3	1/2	2.47
SBI	vs.	WUN	4	1/2	2	5	2	4	8	3	3	3	3	1/2	2.47
SBI	vs.	CUT	5	1/2	2	7	2	8	8	4	3	5	4	1/4	2.83
TER	vs.	WOV	3	1	1	1	1/2	7	6	3	2	3	1	2	1.90
TER	vs.	WUN	2	1/2	1	5	1/2	4	6	4	2	3	1	1/4	1.63
TER	vs.	CUT	3	2	1	7	1/2	9	6	5	2	5	2	1	2.64
WOV	vs.	WUN	1/2	1/2	1	3	1	1/5	2	2	2	1/2	1	1/3	0.87
WOV	vs.	CUT	1	1/2	1	5	1	3	1/2	3	2	3	2	1/3	1.37
WUN	vs.	CUT	2	2	1	3	1	5	2	2	1/2	3	2	3	1.90

Tabla 21. Agregación de los juicios comparativos entre estrategias de restauración para el sub-criterio coste inversión (CO)

			Tesis Doctoral												
<b>Comparación por pares</b>			<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>M. geom.</b>
ROO	vs.	SBI	3	3	1	9	2	4	6	3	2	4	2	4	3.09
ROO	vs.	TER	2	1	2	1	1	1	6	2	1	5	2	2	1.77
ROO	vs.	WOV	5	2	2	3	2	7	8	4	1/2	7	2	1	2.75
ROO	vs.	WUN	3	2	2	5	4	5	8	5	1/3	7	1	2	2.79
ROO	vs.	CUT	5	1	2	7	4	9	8	6	1/3	9	2	2	3.26
SBI	vs.	TER	1/2	1/2	1	1/9	1/2	1/3	1	1/2	1/2	4	1	1	0.64
SBI	vs.	WOV	4	1/2	2	1/7	2	5	1	2	1/2	5	1	1	1.32
SBI	vs.	WUN	2	1/2	2	1/5	4	5	4	3	1/3	6	1/2	1	1.46
SBI	vs.	CUT	4	1/3	2	1/3	4	8	4	4	1/3	8	2	1/2	1.81
TER	vs.	WOV	4	2	2	3	2	7	4	3	1/2	4	1	3	2.46
TER	vs.	WUN	3	2	2	5	4	6	4	4	1/3	3	1/2	3	2.39
TER	vs.	CUT	4	1	2	7	4	9	4	5	1/3	6	2	2	2.88
WOV	vs.	WUN	3	2	1	3	2	1/4	2	2	1/2	1/2	1/2	2	1.20
WOV	vs.	CUT	1	1	1	7	2	4	2	3	1/2	3	1	2	1.78
WUN	vs.	CUT	3	2	1	3	1	4	1/2	2	2	4	1	1	1.70

Tabla 22. Agregación de los juicios comparativos entre estrategias de restauración para el sub-criterio coste explot. (OM)

<b>LA</b>	ROO	SBI	TER	WOV	WUN	CUT
ROO	1.0000	1.4066	0.8210	1.5020	1.1981	0.6996
SBI	0.7109	1.0000	0.8697	1.1677	1.1663	0.5887
TER	1.2181	1.1498	1.0000	1.2721	1.1608	0.5992
WOV	0.6658	0.8564	0.7861	1.0000	0.7596	0.5223
WUN	0.8347	0.8574	0.8614	1.3164	1.0000	0.5325
CUT	1.4294	1.6985	1.6690	1.9147	1.8779	1.0000

$\lambda_{max}=6.0238$      $CI=0.0047$      $CR=0.0038<0.1$

Tabla 25a. Valor propio máximo y análisis de consistencia para la matriz de comparación por pares para las seis estrategias de restauración, con respecto al sub-factor impacto paisajístico (LA)

<b>VI</b>	ROO	SBI	TER	WOV	WUN	CUT
ROO	1.0000	0.9295	0.9965	1.3733	1.1160	0.7109
SBI	1.0759	1.0000	0.7977	1.1611	1.0818	0.6983
TER	1.0035	1.2536	1.0000	1.1571	0.9791	0.6432
WOV	0.7282	0.8612	0.8642	1.0000	0.7037	0.4517
WUN	0.8960	0.9244	1.0213	1.4210	1.0000	0.5490
CUT	1.4067	1.4320	1.5547	2.2138	1.8216	1.0000

$\lambda_{max}=6.0239$      $CI=0.0047$      $CR=0.0038<0.1$

Tabla 25b. Valor propio máximo y análisis de consistencia para la matriz de comparación por pares para las seis estrategias de restauración, con respecto al sub-factor impacto visual (VI)

<b>BI</b>	ROO	SBI	TER	WOV	WUN	CUT
ROO	1.0000	1.5651	1.4422	0.9246	0.8432	0.8502
SBI	0.6389	1.0000	1.3160	0.9614	0.8986	1.2165
TER	0.6934	0.7599	1.0000	0.8281	0.6760	0.6708
WOV	1.0816	1.0401	1.2076	1.0000	0.8408	0.8363
WUN	1.1860	1.1128	1.4793	1.1893	1.0000	0.9582
CUT	1.1762	0.8221	1.4907	1.1957	1.0436	1.0000

$\lambda_{max}=6.0513$      $CI=0.0102$      $CR=0.0082<0.1$

Tabla 25c. Valor propio máximo y análisis de consistencia para la matriz de comparación por pares para las seis estrategias de restauración, con respecto al sub-factor medio biótico (BI)

<b>AB</b>	ROO	SBI	TER	WOV	WUN	CUT
ROO	1.0000	1.0958	1.3347	2.0963	2.0458	1.1066
SBI	0.9126	1.0000	1.4141	2.9676	2.3735	1.3652
TER	0.7492	0.7072	1.0000	1.6331	1.3129	1.0957
WOV	0.4770	0.3370	0.6123	1.0000	0.9999	0.7241
WUN	0.4888	0.4213	0.7617	1.0001	1.0000	0.6674
CUT	0.9037	0.7325	0.9127	1.3809	1.4984	1.0000

$\lambda_{max}=6.0317$      $CI=0.0063$      $CR=0.0050<0.1$

Tabla 25d. Valor propio máximo y análisis de consistencia para la matriz de comparación por pares para las seis estrategias de restauración, con respecto al sub-factor medio abiótico (AB)

<b>SA</b>	ROO	SBI	TER	WOV	WUN	CUT
ROO	1.0000	0.9438	0.6835	0.7461	0.6222	0.6516
SBI	1.0596	1.0000	0.8453	0.8872	0.7091	0.7490
TER	1.4631	1.1830	1.0000	0.8872	0.7091	0.7490
WOV	1.3403	1.1271	1.1272	1.0000	0.9214	1.1496
WUN	1.6072	1.4101	1.4103	1.0853	1.0000	0.8538
CUT	1.5348	1.3351	1.3350	0.8699	1.1713	1.0000

$\lambda_{max}=6.0247$      $CI=0.0049$      $CR=0.0040<0.1$

Tabla 25e. Valor propio máximo y análisis de consistencia para la matriz de comparación por pares para las seis estrategias de restauración, con respecto al sub-factor seguridad vial (SA)

<b>US</b>	ROO	SBI	TER	WOV	WUN	CUT
ROO	1.0000	1.4282	1.5651	2.2329	1.6236	2.9938
SBI	0.7002	1.0000	1.4406	2.3915	2.0395	3.0590
TER	0.6389	0.6941	1.0000	1.9893	1.3083	2.3530
WOV	0.4479	0.4182	0.5027	1.0000	0.7790	1.0537
WUN	0.6159	0.4903	0.7643	1.2837	1.0000	1.4066
CUT	0.3340	0.3269	0.4250	0.9490	0.7109	1.0000

$\lambda_{max}=6.0358$      $CI=0.0071$      $CR=0.0057<0.1$

Tabla 25f. Valor propio máximo y análisis de consistencia para la matriz de comparación por pares para las seis estrategias de restauración, con respecto al sub-factor afección a usuarios durante la ejecución (US)

<b>TE</b>	ROO	SBI	TER	WOV	WUN	CUT
ROO	1.0000	0.7417	1.5131	0.9184	0.6586	0.5233
SBI	1.3482	1.0000	1.6189	1.0242	0.6414	0.6586
TER	0.6609	0.6177	1.0000	0.6586	0.4249	0.4260
WOV	1.0889	0.9764	1.5184	1.0000	0.6609	0.7606
WUN	1.5184	1.5590	2.3534	1,5132	1.0000	1.2115
CUT	1.9109	1.5184	2.3475	1.3147	0.8254	1.0000

$\lambda_{max}=6.0181$      $CI=0.0036$      $CR=0.0029<0.1$

Tabla 25g. Valor propio máximo y análisis de consistencia para la matriz de comparación por pares para las seis estrategias de restauración, con respecto al sub-factor coordinación con el planeamiento territorial (TE)

<b>HO</b>	ROO	SBI	TER	WOV	WUN	CUT
ROO	1.0000	0.7418	1.6031	0.7280	0.5919	0.7058
SBI	1.3480	1.0000	2.1097	0.8687	0.6961	1.1396
TER	0.6238	0.4740	1.0000	0.5722	0.3950	0.4797
WOV	1.3737	1.1512	1.7477	1.0000	0.7241	0.8908
WUN	1.6894	1.4366	2.5314	1.3809	1.0000	1.3807
CUT	1.4167	0.8775	2.0847	1.1226	0.7243	1.0000

$\lambda_{max}=6.0154$      $CI=0.0030$      $CR=0.0024<0.1$

Tabla 25h. Valor propio máximo y análisis de consistencia para la matriz de comparación por pares para las seis estrategias de restauración, con respecto al sub-factor ocupación en planta (HO)

<b>FR</b>	ROO	SBI	TER	WOV	WUN	CUT
ROO	1.0000	1.0243	1.1225	0.5083	0.4025	0.3243
SBI	0.9763	1.0000	1.2009	0.5973	0.6229	0.4324
TER	0.8909	0.8327	1.0000	0.4962	0.4122	0.3470
WOV	1.9675	1.6742	2.0152	1.0000	0.8380	0.5691
WUN	2.4846	1.6053	2.4259	1.1933	1.0000	0.8129
CUT	3.0837	2.3129	2.8815	1.7572	1.2302	1.0000

$\lambda_{max}=6.0192$      $CI=0.0038$      $CR=0.0030<0.1$

Tabla 25i. Valor propio máximo y análisis de consistencia para la matriz de comparación por pares para las seis estrategias de restauración, con respecto al sub-factor fragmentación de hábitats (FR)

<b>CO</b>	ROO	SBI	TER	WOV	WUN	CUT
ROO	1.0000	2.0576	1.7567	3.3098	3.1536	4.0878
SBI	0.4860	1.0000	0.7672	2.4711	2.4711	2.8343
TER	0.5692	1.3034	1.0000	1.9039	1.6331	2.6377
WOV	0.3021	0.4047	0.5252	1.0000	0.8744	1.3732
WUN	0.3171	0.4047	0.6123	1.1436	1.0000	1.8961
CUT	0.2446	0.3528	0.3791	0.7282	0.5274	1.0000

$\lambda_{max}=6.0547$      $CI=0.0109$      $CR=0.0087<0.1$

Tabla 25j. Valor propio máximo y análisis de consistencia para la matriz de comparación por pares para las seis estrategias de restauración, con respecto al sub-factor económico del coste de inversión (CO)

<b>OM</b>	ROO	SBI	TER	WOV	WUN	CUT
ROO	1.0000	3.0862	1.7722	2.7513	2.7914	3.2617
SBI	0.3240	1.0000	0.6388	1.3222	1.4627	1.8069
TER	0.5642	1.5653	1.0000	2.4569	2.3888	2.8775
WOV	0.3634	0.7563	0.4070	1.0000	0.8744	1.7795
WUN	0.3582	0.6837	0.4186	1.1436	1.0000	1.6984
CUT	0.3065	0.5534	0.3475	0.5619	0.5887	1.0000
$\lambda_{max}=6.0611$ $CI=0.0122$ $CR=0.0097<0.1$						

Tabla 25k. Valor propio máximo y análisis de consistencia para la matriz de comparación por pares para las seis estrategias de restauración, con respecto al sub-factor económico coste de explotación (OM)