



**Tesis doctoral:**

# El Método del Triángulo de Calificaciones (MTC<sup>©</sup>):

*una nueva metodología de apoyo en toma de decisiones complejas*

**Fernando Pérez Rodríguez**

**Departamento de Ingeniería Agroforestal**

**Escuela Politécnica Superior**

**Lugo 2013**





Fernando Pérez Rodríguez

Tesis doctoral

El Método del Triángulo de Calificaciones (MTC<sup>©</sup>):  
*una nueva metodología de apoyo en toma de decisiones  
complejas*

Departamento de Ingeniería Agroforestal

Escuela Politécnica Superior

Lugo, 2013





# El Método del Triángulo de Calificaciones (MTC<sup>©</sup>):

*una nueva metodología de apoyo en toma de decisiones complejas*

Fernando Pérez Rodríguez

Ingeniero de Montes

Memoria para optar al grado de Doctor realizada bajo la dirección del Doctor del Departamento de Ingeniería Agroforestal de la Universidad de Santiago de Compostela

ALBERTO ROJO ALBORECA

V<sup>o</sup>B<sup>o</sup>

El director de la Tesis

ALBERTO ROJO ALBORECA

Departamento de Ingeniería Agroforestal

Escuela Politécnica Superior

Lugo, 2013





*A mi familia*



### ***Agradecimientos:***

Quisiera empezar este documento agradeciendo brevemente la inestimable ayuda de todos los que me han apoyado en la realización de mi tesis que, como toda investigación, ha tenido momentos duros y momentos de celebración.

Quiero empezar por el Dr. Alberto Rojo, quien ha sido mi profesor, tutor y director de tesis, y siempre ha estado ahí, desde el primer día, para ayudarme y para que diese rienda suelta a la creatividad en la investigación, sin ningún tipo de limitante.

A Ángeles Camino, al Dr. Esteban Gómez y a Alejandro Mosquera, quienes han estado día a día conmigo, apoyándome en la materialización de una idea que primero se ha convertido en una tesis, y que con nuestro esfuerzo se convertirá en una gran empresa.

A Rocío Camino, que me ha permitido usar una de sus hermosas pinturas para alegrar la encuadernación de mi tesis.



Imagen original de Rocío Camino

A todos los profesores miembros de la *Unidade de Xestión Forestal Sostible* (UXFS), que han confiado en mi proyecto y en mi capacidad de realizarlo, y especialmente, por sus consejos, a los profesores: Dr. Juan Gabriel Álvarez, Dr. Ulises Diéguez, Dr. Guillermo Riesco y Dr. Felipe Crecente.

A la Dra. Almudena Pérez, por la ayuda ofrecida en temas administrativos y de gestión, así como por ser mi compañera de café en estos últimos cuatro años.

Al profesor Dr. Domingos Lopes, que ha sido mi tutor en mi estancia de investigación en la Universidad de Vila Real, le agradezco su ayuda y los buenos ratos pasados.

A mis amigos, por soportarme y ayudarme durante todos estos años de doctorado: María Fraga, Ibán Gómez, Andrea Fernández, Andrea Camporro, Andrés Crespo, Manuel Iván Fernández, Marta Leirós, Clara Fernández, Miguel Lima, Diego Pérez, Gabriel Fernández, Fernando Pérez y Silvia Camino.

A todos los compañeros que están o han estado trabajando en la UXFS durante estos años y con los que he compartido tantas horas de trabajo y también muchas de diversión: Manuel Arias, Vasco Barbosa, Horacio Ferradás, Juan Daniel García, Dra. Andrea Hevia, Dr. César Pérez, Dra. Rosario Pineda, Sonia Ivonne Pulido y Lucía Rego.

Por último, quiero agradecer el apoyo económico que durante estos años he recibido por parte del grupo de investigación *Unidade de Xestión Forestal Sostible* de la Universidad de Santiago de Compostela, que ha estado financiado por la “Ayuda para la consolidación y estructuración de unidades de investigación competitivas del Sistema Universitario de Galicia, modalidad de grupos de referencia competitiva 2011-2013”, de la *Consellería de Educación e Ordenación Universitaria* de la Xunta de Galicia, cofinanciada por la Unión Europea con fondos FEDER.



# Índice

RESUMEN .....	1
SUMMARY .....	7
1 JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS .....	15
2 INTRODUCCIÓN: UNA DECISIÓN COMPLEJA .....	19
2.1 Introducción .....	19
2.2 Metodologías basadas en análisis cuantitativo y almacenamiento de datos .....	23
2.3 Metodologías basadas en el análisis cualitativo, psicológico y en la gestión del conocimiento .....	27
2.3.1 Puntuaciones/ Aditividad .....	29
2.3.1.1 Modelo de la suma ponderada / Modelo del producto ponderado .....	29
2.3.1.2 MAUT (o metodología por clasificación) .....	30
2.3.1.3 PAPRIKA .....	31
2.3.2 Comparaciones pareadas .....	32
2.3.2.1 Fuzzy .....	33
2.3.2.2 ELECTRE .....	34
2.3.2.3 PROMETHEE .....	35
2.3.2.4 AHP .....	36
2.3.2.5 ANP .....	37
2.3.3 Otras metodologías .....	37
2.3.4 Herramientas informáticas de apoyo en la toma de decisiones multicriterio por métodos cualitativos .....	38
2.4 Inteligencia artificial .....	42
2.5 Comparación entre metodologías y tendencias actuales .....	42
3 EL MÉTODO AHP .....	47
3.1 Introducción .....	47
3.2 Metodología .....	48
3.2.1 Definir una jerarquía decisional .....	48
3.2.2 Determinación de preferencias .....	49
3.2.2.1 Establecimiento de preferencias y jerarquía de criterios. Escala de comparación .....	50
3.2.2.2 Inconsistencias .....	52

3.2.2.3	Proceso en un esquema de criterios bifurcados .....	54
3.2.2.4	Establecimiento de preferencias y jerarquía de alternativas bajo un criterio .....	55
3.2.3	Cálculo del peso final de las alternativas .....	56
3.3	El AHP en decisiones grupales .....	57
3.4	Análisis DAFO .....	58
3.5	Síntesis: Limitaciones del método AHP.....	59
3.5.1	Emisión de juicios .....	60
3.5.2	Número de criterios/alternativas .....	60
3.5.3	Utilización de la escala.....	60
3.5.4	Descartar criterios/alternativas de un esquema ya evaluado .....	60
3.5.5	Introducir criterios/alternativas en un esquema ya evaluado .....	61
3.5.6	Idoneidad de las decisiones grupales .....	61
4	DESARROLLO DE SOFTWARE PROPIO PARA LA APLICACIÓN DEL AHP .....	65
4.1	Introducción .....	65
4.2	MPC <sup>©</sup> 1.0 .....	66
4.2.1	Aplicación del programa MPC <sup>©</sup> 1.0: Priorización de desbroce .....	68
4.2.2	Resultados .....	71
4.2.3	Discusión.....	73
4.3	MPC <sup>©</sup> 2.0 .....	74
4.3.1	Aplicación del programa MPC <sup>©</sup> 2.0: Selección de maquinaria forestal .....	77
4.3.2	Resultados .....	79
4.3.3	Discusión.....	83
4.4	MPC <sup>©</sup> 2.01 MEX .....	83
4.4.1	Aplicación del programa MPC <sup>©</sup> 2.01 MEX: Priorización del método de manejo en bosques de México .....	86
4.4.2	Resultados .....	88
4.4.3	Discusión.....	93
5	EL MÉTODO DEL TRIÁNGULO DE CALIFICACIONES (MTC <sup>©</sup> ) .....	97
5.1	Introducción .....	97
5.2	Terminología .....	98
5.3	Metodología .....	99
5.3.1	Emisión de juicios consistentes por comparación de tríos.....	99

5.3.2	Series de comparación: Resolución MTC <sup>©</sup> para un número $n$ de criterios .....	104
5.3.3	Construcción de los vectores de opinión .....	108
5.3.4	Establecimiento de las superficies de opinión y de las regiones de probabilidad de las opiniones .....	111
5.3.4.1	Hipótesis I .....	113
5.3.4.2	Hipótesis II .....	120
5.3.4.3	Hipótesis III.....	123
5.3.4.4	Comparación entre hipótesis .....	125
5.3.4.4.1	Generación de aleatorios bajo una distribución dada.....	125
5.3.4.4.2	Simulación de conjuntos de opiniones en busca de un objetivo .....	128
5.3.4.4.3	Comparación .....	128
5.4	Síntesis: Ventajas de la metodología MTC <sup>©</sup> .....	131
6	APLICACIÓN PRÁCTICA Y COMPARACIÓN ENTRE METODOLOGÍAS .....	135
6.1	Introducción.....	135
6.2	Diseño del experimento .....	136
6.2.1	Objetivo .....	137
6.2.2	Criterios .....	137
6.2.3	Alternativas.....	138
6.2.4	Equipo decisor .....	139
6.3	Resultados.....	139
6.3.1	Resultados con AHP.....	140
6.3.2	Resultados con MTC <sup>©</sup> .....	142
6.3.3	Decisión grupal con MTC <sup>©</sup> .....	146
6.4	Discusión .....	150
7	CONCLUSIONES GENERALES .....	155
7.1	Conclusiones.....	155
7.2	Conclusions .....	159
8	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	163

Nota: La presente tesis doctoral ha sido escrita en formato bilingüe español-inglés para aspirar a la Mención Europea



## RESUMEN

Esta tesis tiene por objetivo estudiar las metodologías de análisis multicriterio que sirven de soporte a decisiones complejas (aquellas en las que intervienen varios criterios y alternativas), dentro de lo que se conoce como MCDM (*Multi Criteria Decision Making*). Concretamente, el trabajo se centra en el análisis del Proceso Analítico Jerárquico o AHP (*Analytic Hierarchy Process*), y en la propuesta de una nueva metodología de toma de decisiones multicriterio, denominada Método del Triángulo de Calificaciones (MTC<sup>©</sup>), para tratar de aprovechar las potencialidades del método AHP y de resolver sus limitaciones.

Para ello, en primer lugar se ha realizado una revisión, descripción y análisis de las actuales metodologías de análisis multicriterio, y se ha propuesto una clasificación de las mismas en tres grandes bloques: (i) Metodologías basadas en análisis cuantitativo y almacenamiento de datos; (ii) Metodologías basadas en el análisis cualitativo, psicológico y en la gestión del conocimiento; e (iii) Inteligencia artificial. Esta tesis se ha centrado en el segundo grupo, formado por numerosas metodologías que, en general, se basan en descomponer una compleja decisión multicriterio en una serie de sencillas decisiones o evaluaciones de criterios y alternativas, ya sea por puntuación o mediante comparaciones pareadas. Dentro de este último grupo se encuadra el AHP (*Analytic Hierarchy Process*), propuesto por T.L. Saaty a finales de la década de los setenta del siglo XX, y que por su simplicidad y versatilidad se ha convertido en el método de toma de decisiones multicriterio más conocido y utilizado en todo el mundo, existiendo una amplísima bibliografía sobre el mismo. Además, el AHP es la base de otras muchas metodologías de toma de decisiones multicriterio.

También se ha realizado una recopilación y resumen de las características de las numerosas herramientas informáticas de apoyo a la toma de decisiones multicriterio por métodos cualitativos encontradas en la bibliografía y en internet, que en su mayoría aplican la metodología AHP.

A continuación se ha analizado el método AHP, que a grandes rasgos consiste en los cuatro siguientes pasos: (i) Definir un esquema decisional o jerarquía de decisión con niveles, incluyendo el objetivo en el nivel 1º, los criterios implicados en la decisión en el nivel 2º y las

alternativas posibles en el nivel 3º; (ii) Estimar pesos o preferencias de los criterios (nivel 2º) comparándolos por pares mediante una determinada escala de valores discretos; (iii) Comparar las alternativas (nivel 3º) por parejas utilizando cada criterio (nivel 2º) por separado, utilizando la misma escala; y (iv) Seleccionar la mejor alternativa. Se ha realizado un análisis DAFO del método AHP, y se han estudiado sus limitaciones, que básicamente se resumen en el común incumplimiento del axioma sobre *juicios recíprocos* en las comparaciones pareadas, en la dificultad de utilización de las escalas y en el elevado número de pares a comparar cuando se cuenta con muchos criterios y/o alternativas.

Se ha desarrollado un programa informático propio para la aplicación de la metodología AHP, denominado MPC<sup>©</sup> (Método de los Pares de Comparación), en español y competitivo a nivel de análisis, cálculo y base de datos respecto a los actualmente existentes de pago en el mercado, con el objetivo de analizar de manera pormenorizada la metodología a nivel cálculo y de interfaz. Para ello se ha partido de una interfaz sencilla, que posteriormente se ha mejorado en sucesivas versiones, materializadas en la serie de software MPC<sup>©</sup> 1.0, 2.0 y 2.01 MEX, utilizando el lenguaje de programación VB.NET<sup>®</sup>. Las tres versiones se han aplicado a casos prácticos dentro del campo forestal.

MPC<sup>©</sup> 1.0 se ha basado en la implementación de la metodología AHP con la finalidad de aplicarla a decisiones de asesoramiento relativamente sencillas, en las que se engloben varios criterios en un esquema de un único nivel, y en las que haya más de una alternativa. El proceso de desarrollo del software ha contemplado en primer lugar el diseño de un entorno visual o formulario, que se ha hecho bajo unas pautas de percepción y ergonomía de los componentes u objetos, con el objetivo de facilitar su uso. Una vez desarrollado el entorno visual se han creado las variables y matrices de tipo *single* (o número de precisión simple) e *integer* (o números enteros de precisión sencilla para índices), entre otros, que soportan los datos de todo el proceso. Por último, se han implementado todas las rutinas de cálculo matricial por medio de módulos de comandos para la automatización de todos los pasos del AHP a nivel matricial: sumas, restas y producto de matrices, extracción de normales y autovectores, y cálculo de inconsistencias. En esta primera versión el software se encarga de exponer directamente los pares a evaluar en la interfaz o panel principal de trabajo de manera automática, mediante combinatoria, sin necesidad de elegir en la matriz qué par va a ser calificado en cada momento. Además, en la exposición de pares se ha introducido la

aleatorización de exposición de elementos a izquierda y derecha del panel de evaluación. Otras características de esta primera versión son: interfaz completamente en español, posibilidad de evaluar hasta 15 criterios y 15 alternativas, bases de datos para almacenar decisiones jerarquizadas (objetivo, criterios y alternativas), creación sencilla de informes en texto y posibilidad de exportar los resultados a hojas de cálculo. MPC<sup>©</sup> 1.0 puede descargarse gratuitamente de la Web del grupo de investigación *Unidade de Xestión Forestal Sostible* (UXFS) de la Universidad de Santiago de Compostela (<http://www.usc.es/uxfs/>).

El programa MPC<sup>©</sup> 2.0 se ha diseñado para mejorar y ampliar las utilidades de la versión anterior, y para ello se han implementado las siguientes características: (i) Metodología AHP automatizada en esquemas bifurcados de criterios de hasta dos niveles, y exposición de cada par de comparación de manera independiente, lo que facilita la automatización de las evaluaciones, focaliza la concentración del decisor en el par expuesto y disminuye el número de pares a evaluar respecto al correspondiente en el caso que se dispusieran todos los subcriterios en un mismo nivel; (ii) Valoración independiente de los criterios y de las alternativas. En el caso de los criterios, se exponen y califican inicialmente los del primer nivel, y posteriormente los criterios de los distintos subniveles de manera independiente. En el caso de las alternativas, la evaluación se realiza en los extremos del esquema (subcriterios del último nivel); (iii) Base de datos propia o capacidad de creación de bases de datos independientes, lo que supone retroalimentación de las calificaciones bajo un factor temporal; (iv) Posibilidad de participación de hasta 40 usuarios y de comparación de sus resultados; (v) Posibilidad de realización de hasta 100 repeticiones por usuario; y (vi) Interfaz de usuario sencilla buscando un fácil aprendizaje de utilización y autonomía, para que el decisor ocupe su tiempo y concentración en el par de comparación, sin que existan otros elementos que le distraigan.

El programa MPC<sup>©</sup> puede ser fácilmente adaptado a casos particulares de tomas de decisiones frecuentes o repetitivas, en los que puede ser muy conveniente, e incluso necesario, diseñar versiones específicas estableciendo un listado cerrado de criterios y alternativas, permitiendo solamente al usuario utilizar o descartar algunos de ellos (o incluso no darle esta posibilidad). Un ejemplo de ello es MPC<sup>©</sup> 2.01 MEX, que es una versión específica del software que ha sido desarrollada para la aplicación de la metodología AHP a la gestión forestal sostenible en el Estado de Durango (México). Con el objetivo concreto de seleccionar el método de manejo

forestal en subrodales de México, en esta versión se ha establecido, por defecto, una lista fija de 18 criterios (divididos en dos niveles, con cuatro criterios raíz) entre los que el usuario puede elegir libremente aquellos que le interese utilizar en cada caso, en función del subrodal o predio que esté manejando. Las alternativas han sido cuatro, aunque existen limitaciones ambientales y legislativas del gobierno mexicano para aplicar algunas de ellas en ciertas condiciones, por lo que se ha establecido un mecanismo de preselección de dichas alternativas utilizando un sistema de árbol decisional que limita la oferta de alternativas en función de los valores de diferentes variables. Por lo demás, el programa MPC<sup>©</sup> 2.01 MEX posee las mismas utilidades que la versión 2.0.

A continuación se ha presentado y descrito una nueva metodología de toma de decisiones multicriterio, denominada “*Método del Triángulo de Calificaciones*” (MTC<sup>©</sup>), que busca aprovechar las potencialidades del método AHP y resolver sus comentados inconvenientes. Las principales características y ventajas del MTC<sup>©</sup> son:

- Evaluación de criterios, y de alternativas bajo cada criterio, por tríos en vez de por parejas. La calificación en triángulos incrementa la concentración de la persona que debe tomar la decisión, disminuyendo la influencia del ambiente y minimizando el sesgo cognoscitivo que se pueda producir en el proceso repetitivo de la decisión.
- Eliminación de escalas y valores discretos en la emisión de juicios. Los triángulos del MTC<sup>©</sup> son superficies continuas que aúnan todas las posibles evaluaciones, y sólo se marcan tendencias graduadas con líneas y círculos que acotan los límites y magnitudes de selección entre los vértices, para ayudar a que el decisor emita su juicio conjunto de los tres criterios a la vez.
- Importante disminución del número de evaluaciones (tríos) a realizar, respecto al elevado número de pares o parejas que es preciso comparar en la aplicación del método AHP cuando se cuenta con muchos criterios y/o alternativas.
- Captura de juicios consistentes, que cumplen el axioma de *transitividad*, evitando los inconvenientes del común incumplimiento del axioma de *juicios recíprocos* en el AHP.
- Establecimiento de series cíclicas cerradas de comparación de criterios y alternativas.
- Establecimiento de (i) *Vectores de opinión* a partir de las evaluaciones de la serie de triángulos en las que interviene un mismo criterio; (ii) *Superficies de opinión*,

delimitadas por los rangos o intervalos obtenidos para cada criterio y alternativa; y (iii) *Regiones de probabilidad de las opiniones* de tres dimensiones, asignando a cada punto del interior de una superficie de opinión una probabilidad de suceso. En sucesivas repeticiones las superficies de opinión y las regiones de probabilidad se pueden ir superponiendo, proporcionando así información de cómo afectan las repeticiones en el tiempo a la decisión, y en el caso de decisiones en grupo se puede valorar el grado de uniformidad existente en las mismas.

A partir de los datos disponibles en los vectores de opinión de la metodología MTC<sup>©</sup> se han evaluado diferentes alternativas (o hipótesis) para establecer las dimensiones, forma y situación en unos ejes de las superficies de opinión y de sus correspondientes regiones de probabilidad tridimensionales, mediante su aplicación a un caso práctico. La hipótesis finalmente adoptada ha sido: *“Todos los puntos que se enmarcan dentro de la superficie de opinión poseen una probabilidad de suceso según una distribución normal bivalente, caracterizada por una media y una desviación estándar de cada una de las dos variables + El peso de los criterios y el peso de las alternativas son independientes”*. Asumiendo esta hipótesis, las superficies de opinión tienen forma de elipses y las regiones de probabilidad de las opiniones son paraboloides elípticos.

Finalmente, se ha llevado a cabo una comparación entre las metodologías AHP y MTC<sup>©</sup>, aplicándolas a un mismo caso práctico en el campo forestal. Con las dos metodologías se ha elegido la misma alternativa, lo cual es muy recomendable e indicativo de que ambas se pueden aplicar con garantías en determinados casos. Sin embargo, los resultados han indicado que el MTC<sup>©</sup> resulta tanto más recomendable cuanto mayor sea el número de criterios y/o alternativas, y también de forma especial en las decisiones grupales.

**Palabras clave:** Análisis Multicriterio, MCDM (*Multi Criteria Decision Making*), AHP (*Analytic Hierarchy Process*), MPC<sup>©</sup> (Método de los Pares de Comparación), Método del Triángulo de Calificaciones (MTC<sup>©</sup>), Análisis de sensibilidad, Probabilidad, Satisfacción, Optimización.



## SUMMARY

The topic of this thesis is the use of multi-criteria analysis techniques as an aid to making complex decisions (i.e. decisions involving several criteria and alternatives). The study specifically focuses on the Analytic Hierarchy Process (AHP) and proposes an adaptation of this technique for use in Multi-criteria Decision Making (MCDM). The proposed Triangular Assessment Method (denominated *Método del Triángulo de Calificaciones* in Spanish and thus abbreviated to MTC<sup>©</sup>) makes use of the benefits of the AHP method and also resolves some of the limitations of this method.

The current methods of multi-criteria analysis were first reviewed, analyzed and described. The methods were classified into three broad groups: (i) Methods based on qualitative analysis and data storage; (ii) Methods based on qualitative and psychological analysis and knowledge management; and (iii) Artificial intelligence. This thesis focuses on the second group, which comprises numerous techniques that generally involve decomposing a complex multi-criteria decision into a series of simple decisions or evaluations of the criteria and alternatives, either by awarding scores or by pairwise comparisons. This group includes the Analytic Hierarchy Process (AHP), which was first proposed by T.L. Saaty at the end of the 1970s. Because of its simplicity and versatility, this technique is one of the best known and most commonly used tools in multi-criteria decision making, and much has been written about its applications. The AHP is also the basis of many other multi-criteria decision making methods.

The characteristics of the numerous software support tools used in qualitative methods of multi-criteria decision making were also reviewed and summarized. Articles in the relevant literature and on the internet, most of which apply to the AHP method, were reviewed.

The AHP basically consists of the following four steps: (i) Definition of a decision scheme or decision hierarchy with three levels, with the objective in level 1, the criteria involved in the decision in level 2 and the possible alternatives in level 3; (ii) Estimation of the weights or preferences of the criteria (level 2) and pairwise comparisons of these using a scale of discrete values; (iii) Pairwise comparison of the decision alternatives (level 3), considering each criterion (level 2) separately; and (iv) Selection of the best alternative. The AHP method was evaluated by SWOT analysis to identify the limitations of the method, which can be summarized as follows: non fulfillment of the axiom concerning *reciprocal judgments* in the

pairwise comparisons; difficulty in using the scales; and the large number of pairs that must be compared when the process involves numerous criteria and/or alternatives.

As part of this doctoral research, a computer program was developed specifically for applying the AHP. The program, which is called *Método de los Pares de Comparación* in Spanish (Pairwise Comparison Method), and thus denominated MPC<sup>©</sup>, offers several advantages (in terms of analytical power, ease of calculation and type of database) over other programs currently available on the market. The program was developed to enable detailed analysis of the method at the calculation and interface levels. A simple interface was used as the starting point and has been improved in successive versions of the software, MPC<sup>©</sup> 1.0, 2.0 and 2.01 MEX, developed with VB.NET<sup>®</sup> programming language. All three versions have been applied to practical cases in the field of forestry.

In MPC<sup>©</sup> 1.0, the AHP method is implemented for application to relatively simple decisions, in which several criteria are included in schemes with only one level or in schemes with more than one alternative. The software was developed by first designing a visual environment or questionnaire, which was constructed by applying some principles of perception and ergonomics of the components or objects, with the aim of simplifying the use of the program. After developing the visual environment, the single type variables (or single-precision numbers) and integers (or whole numbers of single precision for indices), amongst others, were created to support the data from the entire process. Finally, all of the routines for matrix calculations were implemented by command modules that enabled automatization of all of the AHP steps at matrix level: addition, subtraction and multiplication of matrices, extraction of normals and eigenvectors and calculation of inconsistencies. In this first version of the software, the pairs being evaluated are automatically displayed at the interface or main work panel, by combinatorial analysis, without the need to select which pair will be classified in the matrix each time. Furthermore, display of the pairs includes randomization of the elements shown on the left and right hand sides of the evaluation panel. Other characteristics of this first version include the following: interface completely in Spanish; possibility of evaluating up to 15 criteria and 15 alternatives; databases for storing hierarchized decisions (objectives, criteria and alternatives) and creation of text-based reports and the option of exporting the results to spreadsheets. MPC<sup>©</sup> 1.0 can be downloaded free of charge from the webpage of the

---

*Unidade de Xestión Forestal Sostible (UXFS)*, a research group at the University of Santiago de Compostela (<http://www.usc.es/uxfs/>).

MPC<sup>©</sup> version 2.0 was designed with the aim of improving and expanding the utilities offered in the first version of the program, by implementing the following: (i) Automated AHP method in bifurcated schemes with criteria at up to two levels, and independent display of each pair being compared. This facilitates automatization of the evaluations, focuses concentration of the decision maker on the pair shown and decreases the number of pairs that must be evaluated relative to the case in which all sub-criteria are included in the same level; (ii) Independent evaluation of the criteria and the decision alternatives. In the case of the criteria, those at the first level are initially shown and evaluated, and then the criteria for the different sublevels are shown and evaluated independently. In the case of the decision alternatives, the evaluation is made at the scheme extremes (final level sub-criteria); (iii) Use of own database or capacity to create independent databases, which supposes feedback of the classifications under a temporal factor; (iv) Possibility of participation of up to 40 users and comparison of their results; (v) Possibility of carrying out up to 100 repetitions per user; and (vi) Simple, user-friendly interface aimed at making the program easy to learn to use, so that the decision maker spends their time and effort in comparing the pairs, without being distracted by other elements.

The MPC<sup>©</sup> software can be readily adapted to particular cases of frequent or repetitive decision-making, in which it may be useful, or even necessary, to design specific versions with an established list of criteria and alternatives, in which only the user can decide to use or reject (this possibility may not even be offered). One example of this is MPC<sup>©</sup> version 2.01 MEX, which is a version of the software specifically designed for application of the AHP method to sustainable forest management in Durango State (Mexico). With the specific aim of selecting the forest management method for sub-stands in Mexico, this version of the program established, by default, a fixed list of 18 criteria (divided into two levels, with four root criteria) from which the user can choose those of interest in each case, depending on sub-stand or piece of land in question. Four alternatives were established. However, as there are legislative and environmental limitations for the application of some of these under certain conditions (imposed by the Government of Mexico), a mechanism was established for the preselection of alternatives by using a decision-making tree that limits the alternatives on the

basis of the values of the different variables. In other respects, MPC<sup>©</sup> version 2.01 MEX possesses the same characteristics as version 2.0.

A new multi-criteria decision making method, denominated *Método del Triángulo de Calificaciones* (MTC<sup>©</sup>) in Spanish (translation, Triangular Assessment Method), which aims to make use of the potential of the AHP while resolving the above-mentioned drawbacks, is presented and described below. The main characteristics and advantages of the MTC<sup>©</sup> are as follows:

- Evaluation of criteria, and of the decision alternatives for each criterion, in trios instead of in pairs. The triangular assessment increases the concentration of the decision maker, by decreasing environmental influences and minimizing the cognitive skew that can be produced during repetitive decision making processes.
- Elimination of discrete scales and values involved in judgments. The MTC<sup>©</sup> triangles are continuous surfaces that join all possible evaluations, and graduated trends are marked with lines and circles that enclose the limits and selection magnitudes between the vertices of the triangles, to aid the decision maker to make simultaneous decisions about all three criteria.
- Considerable decrease in the number of evaluations (trios) to be carried out, relative to the large number of pairs that must be compared on applying the AHP method to cases involving numerous criteria and/or decision alternatives.
- Consistent judgment making, which complies with the axiom of *transitivity*, thus avoiding the drawback of the frequent unfulfillment of the axiom of *reciprocal judgments* in the AHP.
- Establishment of closed cyclical series for comparing criteria and decision alternatives.
- Establishment of: (i) *Opinion vectors* from the evaluations of a series of triangles that include the same criterion; (ii) *Opinion surfaces*, delimited by the ranges or intervals obtained for each criterion and decision alternative; and (iii) *Probability regions for the opinions* in three dimensions, in which the probability of occurrence is assigned to each point within the opinion surface. In successive repetitions, the opinion surfaces and the probability regions will overlap, thus providing information about how the

repetitions affect the time the decision takes, and in the case of group decisions, enabling evaluation of the degree of uniformity in the decisions.

From the data available in the MTC<sup>©</sup> method opinion vectors, different alternatives (or hypotheses) were evaluated in order to establish the dimensions, form and situation on some axes of the opinion surfaces and their corresponding tridimensional probability regions, by application to a real case. The hypothesis finally adopted was as follows: *“All points within the opinion surface have a probability of occurrence with a normal bivariate distribution, characterized by a mean value and standard deviation for each of the two variables. The weight of the criteria and the weight of the alternatives are independent”*. Assuming that this hypothesis is true, the opinion surfaces are elliptical and the probability regions are elliptic paraboloids.

Finally, the AHP and MTC<sup>©</sup> methods were compared by applying both methods to a practical example in the field of forestry. Both methods selected the same highly alternative, which is a good indication that both can be successfully applied in certain cases. However, the results indicated that the MTC<sup>©</sup> is particularly recommendable in cases with numerous criteria and/or alternatives and also in cases involving group decisions.

**Keywords:** Multi-criteria analysis, MCDM (Multi Criteria Decision Making), AHP (Analytic Hierarchy Process), MPC<sup>©</sup> (Paired Comparison Method), Triangular Assessment Method (MTC<sup>©</sup>), Sensitivity analysis, probability, satisfaction, optimization.



UTA

*Experience is the name we give to our mistakes*

Oscar Wilde

UNIVERSIDADE  
DE SANTIAGO  
DE COMPOSTELA



# Capítulo 1

---

## 1 JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

La creciente sensibilización de la sociedad actual por los temas ambientales, sobre todo en un contexto de cambio climático palpable, así como las repercusiones sociales y la viabilidad económica, han de ser consideradas a la hora de tomar cualquier decisión en los proyectos o estudios de ingeniería, para conseguir hacerlos viables.

Tener en cuenta en un mismo proceso de decisión criterios económicos, sociales, ambientales y propiamente técnicos implica una gran dificultad, especialmente cuando se trata de aunar criterios objetivos, fácilmente cuantificables, con otros subjetivos, mucho más difíciles de cuantificar. Para ayudar a la valoración de esos criterios existen multitud de metodologías, dentro de lo que se conoce como “análisis multicriterio” o también MCDM (*Multi Criteria Decision Making*). Cada metodología tiene su propia síntesis de cálculo, pero sin embargo se puede decir que en algunas de las más utilizadas los criterios y/o alternativas que entran en una decisión son evaluados o comparados mediante la emisión de un juicio por parte del decisor, utilizando una determinada escala.

Una de las metodologías de decisión multicriterio más ampliamente aplicadas y estudiadas, desde su creación a finales de la década de los setenta del siglo XX por Saaty (1977, 1980), es el llamado Proceso Analítico Jerárquico o AHP (*Analytic Hierarchy Process*). Esta metodología se basa en la asignación de un peso (o preferencia) a los criterios y/o alternativas por medio de comparaciones pareadas, bajo una escala dada (Saaty 1990, 1996b). Sin embargo, en aquellas decisiones en las que se manejan muchos criterios y/o alternativas es preciso evaluar un muy elevado número de pares, por lo que puede producirse una pérdida progresiva de atención del decisor al tratarse de un proceso de comparación largo y rutinario, resultando con ello errores e inconsistencias que pueden inutilizar todo el proceso.

Por todo ello, el objetivo principal de esta tesis doctoral es desarrollar una nueva metodología de toma de decisiones multicriterio que aproveche las potencialidades del método AHP y resuelva sus limitaciones. Para ello, los objetivos concretos planteados son:

1. Estudiar y describir las principales metodologías de análisis multicriterio de apoyo a decisiones complejas, y establecer una clasificación de las mismas.
2. Realizar un estudio de la metodología AHP, mediante un análisis DAFO, para establecer sus ventajas y limitaciones.
3. Desarrollar un software para la aplicación del método AHP, denominado MPC<sup>©</sup>, en español y competitivo a nivel de análisis, cálculo y base de datos con los actualmente existentes de pago en el mercado, con la finalidad de fomentar la investigación en este tipo de metodologías de análisis multicriterio y en su aplicación, en específico, al campo forestal. Como objetivo parcial se considera:
  - Describir las diferentes versiones realizadas de MPC<sup>©</sup> y su aplicación a distintos casos prácticos relacionados con la gestión forestal.
4. Presentar una nueva metodología de decisión multicriterio, denominada “*Método del Triángulo de Calificaciones*” (MTC<sup>©</sup>), que amplíe las posibilidades del método AHP y minimice sus limitaciones. Para el desarrollo de esta nueva metodología se han considerado los siguientes objetivos parciales:
  - La metodología de emisión de juicios debe basarse en principios lógicos y axiomáticos.
  - El método debe tener en cuenta los sesgos cognoscitivos que puedan afectar al proceso de toma de decisiones.
  - Debe primar la sencillez de uso.
  - Debe tenerse en cuenta la variabilidad temporal y espacial en un mismo proceso de un mismo decisor.
  - Se debe minimizar el tiempo que se invierte en la emisión de juicios, sin que con ello se afecte a la fiabilidad de los resultados, así como detectar la incertidumbre en los resultados bajo unos límites conocidos.
  - La aplicación del método debe desembocar en unos resultados que puedan ser valorados y comparados de forma objetiva.
5. Comparar las metodologías AHP y MTC<sup>©</sup> mediante su aplicación a un caso práctico relacionado con la gestión forestal.



*El hombre que pretende verlo todo con claridad antes de decidir  
nunca decide*

**Henry F. Amiel**





# Capítulo 2

---

## 2 INTRODUCCIÓN: UNA DECISIÓN COMPLEJA

### 2.1 Introducción

Nuestra vida cotidiana está llena de decisiones, por lo que *“todos nosotros somos fundamentalmente decisores”* (Saaty 2008). En nuestros primeros años de vida son nuestros padres quienes toman las decisiones por nosotros: deciden nuestra ropa, nuestra comida, a qué guardería o colegio vamos, etc. Poco a poco, nuestra capacidad de razonamiento se va desarrollando y adquirimos la capacidad de tomar nuestras propias decisiones, que serán acertadas o no, pero que nos dotarán de un carácter y una personalidad en nuestra rutina diaria que condicionarán las decisiones posteriores.

Pero ¿Qué es una decisión?: La Real Academia Española (RAE) da dos definiciones a la palabra decisión: *“Determinación, resolución que se toma o se da en una cosa dudosa”*; y *“Firmeza de carácter”*. De acuerdo a la primera definición, aparecen los conceptos de resolución del problema, en el sentido de elegir o seleccionar entre varias posibilidades o alternativas, y de incertidumbre, que emana de la duda existente en dicha selección. La segunda definición está enfocada al carácter o personalidad del decisor en la toma de decisiones.

La resolución o determinación de una decisión es, por tanto, el resultado del propio proceso de toma de decisiones, lo cual puede ser una tarea sencilla o complicada dependiendo del tipo de decisión que se afronte. Con respecto a esto, se pueden diferenciar dos tipos de decisiones (Gorry & Scott-Morton 1971):

- **Decisiones estructuradas o programadas:** Son aquellas decisiones cotidianas, rutinarias, que son resueltas de manera sistemática por estar bajo unos protocolos de actuación bien conocidos y cuya dificultad y riesgo son pequeños.

- **Decisiones no estructuradas o no programadas:** Son decisiones poco frecuentes, que necesitan ser reflexionadas y cuya solución ha de ser diseñada y estudiada para ese problema en concreto. La complejidad de estas decisiones es mucho mayor que la de las estructuradas.

En este trabajo se abordan las decisiones no estructuradas, cuya complejidad depende de los factores, criterios y/o alternativas que se tengan en cuenta bajo un determinado objetivo o meta. Así, una persona puede tomar una decisión complicada tirando una moneda al aire, y con ello dejar al azar las consecuencias de esa decisión; pero sin embargo se hace necesario eliminar o minimizar el azar en la toma de decisiones, especialmente cuando llevan asociadas una inversión económica, de recursos y/o de tiempo que necesite ser evaluada con precisión, con el fin de poder ajustarse a la solución adecuada para conseguir un objetivo.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, la dificultad de tomar una decisión se acrecienta si se considera la evaluación de forma conjunta de numerosos criterios junto a diferentes alternativas bajo una misma meta (Altuzarra *et al.* 2000). Para ayudar en esta tarea se proponen tres grandes grupos de soluciones (Vitoriano 2007):

- **La teoría de la decisión con incertidumbre o riesgo**, en la que se analiza la toma de decisiones con aleatoriedad o incertidumbre en los resultados, de modo que las consecuencias de una decisión no están determinadas de antemano, sino que están sujetas al azar.
- **La decisión multicriterio** (o, como se suele denominar, MCDM, de sus siglas en inglés: *Multi Criteria Decision Making*), en la que están perfectamente determinadas las consecuencias de una decisión, aunque no está definido tan claramente qué es lo mejor, pudiendo existir varios objetivos en conflicto.
- **La teoría de juegos**, en la que las consecuencias de una decisión no dependen únicamente de la decisión adoptada, sino también de la que elijan otros jugadores. En este contexto, los problemas de decisión con aleatoriedad suelen ser denominados juegos frente a la naturaleza.

Específicamente en el campo forestal, los requerimientos de la sociedad actual obligan a tener en cuenta muchos criterios de diversas tipologías, los cuales pueden y suelen englobarse en económicos, sociales, ambientales y técnicos. Dichos criterios han de ser considerados como

los pilares en los que asentar un anteproyecto, un proyecto o cualquier decisión en gestión forestal para que pueda considerarse como sostenible, lo que supone la dificultad de tener en cuenta variables de fuerte componente subjetiva o de opinión, como pueden ser ciertos criterios sociales y/o ambientales.

En el marco de proyectos de ingeniería se justifica la utilización de las metodologías de análisis multicriterio (Tam *et al.* 2006), ya que las alternativas han de ser conocidas de antemano por la necesidad de estudiar su viabilidad y de ser presupuestadas. Por este motivo, el paradigma de este tipo de decisiones es que se parte de un conjunto de soluciones factibles o alternativas, que se asocian a un grado de deseabilidad o apetencia bajo un número de criterios establecido (Romero 1993). Sin embargo, es necesario buscar la respuesta a la siguiente pregunta: ¿Cuál es la mejor alternativa? Para ello se ha de diferenciar entre dos conceptos, el de *optimización*, que corresponde a aquella solución a la que se llega mediante la utilización de modelos matemáticos como la programación lineal, con la que se busca maximizar o minimizar una función matemática conocida (Ignizio & Romero 2003); y el de *satisfacción* (Simon 1956), que corresponde a una solución viable y factible, pero que no se puede asumir como óptima por desconocimiento de cómo repercutirá en el objetivo marcado, especialmente en un contexto de incertidumbre. Existen trabajos que analizan este contexto, como por ejemplo Velez (2003).

Desde los comienzos de lo que se puede denominar ciencia de la toma de decisiones, muchos investigadores han trabajado en el tema dando lugar a una extensa bibliografía, desarrollando nuevas utilidades y un sinfín de metodologías que han surgido del intento de la mejora continua. Dentro de esa amplia literatura sobre la toma de decisiones no faltan los casos de controversia o de diferentes puntos de vista entre autores, que pueden llevar a confusión al lector. Un ejemplo de ello es el caso de la definición de MAUT (*Multi-Attribute Utility Theory*), que algunos autores como Dyer & Forman (1992) tratan como campo central de la ciencia de la decisión a la par del MCDM, incluso haciéndolos sinónimos en muchos casos, en contraposición a lo que piensan otros autores como Wang *et al.* (2010), que tratan al MAUT como un método particular y lo comparan con otros.

Debido a la gran diversidad de metodologías de análisis multicriterio que sirven como sistema de soporte de decisiones, a los diversos criterios que utilizan para su clasificación los distintos

autores que han tratado el tema, y a que numerosas metodologías se mezclan, complementan o hibridan, no resulta nada sencillo establecer una clasificación coherente de las mismas.

Con el objeto de proceder a una ordenación de los diferentes modelos matemáticos y metodológicos de ayuda a las decisiones multicriterio existentes, a continuación se presenta una clasificación realizada teniendo en cuenta lo indicado en los trabajos de Romero (1993), Angehrn & Jelassi (1994), Eom (1996), Matsatsinis & Samaras (2001), Nemati *et al.* (2002) y Shim *et al.* (2002):

- **Metodologías basadas en análisis cuantitativo y almacenamiento de datos:**
  - Investigación Operativa (IO):
    - Optimización:
      - Programación multiobjetivo.
      - Programación compromiso.
      - Programación por metas.
  - Gestión de bases de datos.
  - Gestión de los sistemas de información.
- **Metodologías basadas en el análisis cualitativo, psicológico y en la gestión del conocimiento:**
  - Juicios humanos individuales:
    - Teoría de la decisión del comportamiento.
    - Ciencia cognitiva o estudio de la mente.
    - Interacción persona-ordenador.
  - Comportamiento organizativo o de grupo:
    - Decisiones en grupo:
      - Cara a cara.
      - Distanciamiento temporal.
      - Estructuras de proceso (democrática o jerárquica).
      - Negociaciones:
        - Puesta en común, cooperación o negociación.
- **Inteligencia artificial:**
  - Razonamiento basado en casos (adiestramiento).
  - Sistemas expertos.
  - Redes bayesianas, métodos basados en la inferencia probabilística.

A continuación se procederá a analizar cada uno de los puntos del esquema propuesto, así como las metodologías asociadas y las herramientas más importantes o relevantes para su aplicación.

## 2.2 Metodologías basadas en análisis cuantitativo y almacenamiento de datos

Dentro de este gran grupo se enmarcan las tres principales disciplinas de análisis matemático cuantitativo en lo que se refiere a sistemas de soporte de la decisión, como son la *investigación operativa*, la *gestión de bases de datos* y la *gestión de sistemas de información*. Actualmente estas disciplinas no pueden ser analizadas individualmente, ya que comparten muchas utilidades y procesos, que se van a analizar paso a paso.

Es difícil datar el nacimiento o los precursores de la *investigación operativa*, pero esta disciplina tomó fuerza en el transcurso de la II Guerra Mundial con el fin de poder predecir y analizar los resultados de una acción en base a unos objetivos organizativos con rigor matemático (Saaty 2004). Posteriormente a la II Guerra Mundial la *investigación operativa* ha sido desarrollada por investigadores civiles y utilizada, sobre todo, en procesos y campos industriales, como los que indica el mismo Saaty (2004):

- A. Grandes problemas de la industria y su relación con la economía global (máximo nivel de planificación y control).
  - 1. Utilización óptima del capital.
  - 2. Expansión y crecimiento: distribución geográfica de factorías.
  - 3. Mercados cambiantes y efectos de la evolución de la tecnología.
- B. Producción.
  - 1. Costes.
  - 2. Esquemas productivos (programación lineal).
    - a. Para un único período.
    - b. Para un número arbitrario de períodos.
  - 3. Análisis de maquinaria-capital-equipos.
    - a. Capacidad, carga óptima.
    - b. Fiabilidad y mantenimiento de equipos.

- c. Defectos.
  - d. Muestreo preventivo.
  - e. Reparaciones como un problema de gestión de colas.
4. Utilización eficiente del personal.
  5. Diseño de productos.
  6. Congestión en las operaciones de servicio.
  7. Capacidad.
  8. Control de calidad.
- C. Control de inventarios.
1. Cuando las demandas son conocidas.
  2. Cuando se desconocen las demandas.
- D. Ventas-marketing.
1. Esfuerzo de promoción y efectividad de la publicidad.
  2. Previsión de precios.
  3. Previsión de las necesidades de fabricación.
  4. Análisis de los hábitos de compra de los consumidores.
  5. Distribución geográfica óptima de la publicidad.
- E. Compras.
1. Tamaño óptimo de pedidos.
  2. Compra selectiva.
  3. Hábitos de compra del consumidor.
- F. Transporte.
- G. El uso de ordenadores en la investigación operativa industrial.

Los grandes avances de las últimas décadas en campos como la informática y la matemática han dotado a la *investigación operativa* de unas herramientas sofisticadas en la toma de decisiones complejas, y ha conllevado su fusión con otras disciplinas como la *gestión de bases de datos* (Lee 1985), así como del propio uso que se hace de esa información, enmarcándose esto último en *gestión de los sistemas de información* (Nevo & Wanb 2005).

El almacenamiento de información en bases de datos con una arquitectura definida sirve de soporte para la aplicación de inferencia estadística en toma de decisiones según un objetivo marcado, que puede ser, por ejemplo, la búsqueda de tendencias o análisis de mercados, entre

otros. Para ello, existen multitud de herramientas para la gestión de bases de datos, y seguramente las más conocidas son Oracle, MySQL y SQLite.

Por otra parte, los gestores de sistemas de información son una herramienta muy útil a la hora de manejar gran cantidad de datos o información. Quizá el ejemplo más ilustrativo de gestor de sistemas de información en el campo forestal sean las aplicaciones GIS o Sistemas de Información Geográfica, que se basan en información geo-referenciada, y que ayudan a tomar decisiones, por ejemplo, mediante la creación de planos de aptitud, existiendo herramientas como ArcView<sup>®</sup>, ArcGis<sup>®</sup> o GVSIG<sup>®</sup>.

El mayor avance de la gestión de datos en conjunción con la investigación operativa es el caso de la modelización matemática, que se puede definir como “*una abstracción (reducción o aproximación) del mundo natural real*” (Brans 2002), y que se puede dividir en (Pena de Ladaga & Berger 2006):

- *Modelos prescriptivos*, que ayudan a tomar una decisión en base a la optimización de recursos.
- *Modelos predictivos*, que ayudan a simular resultados futuros.
- *Modelos descriptivos*, que están relacionados con la organización.

Estas metodologías se fundamentan en modelos matemáticos, más o menos complejos, que utilizan variables cuantificables o estimables bajo cierta representatividad, y cuyo cálculo no depende de la subjetividad u opinión de una persona. Un resumen de estos modelos matemáticos se muestra en la Tabla 2.1.

**Tabla 2.1:** Tipos de modelos matemáticos (Pena de Ladaga & Berger 2006).

Categoría	Forma de la función	Valores de las variables independientes	Técnicas de análisis
<b>Modelos prescriptivos</b>	Conocida; Bien definida	Conocidos o bajo el control del decisor	Programación lineal, no lineal, entera de metas, redes
<b>Modelos predictivos</b>	Desconocida; Incompletamente definida	Conocidos o bajo el control del decisor	Análisis de regresión, de series de tiempo, discriminante
<b>Modelos descriptivos</b>	Desconocida; Bien definida	Desconocidos o inciertos	Simulación, PERT, modelos de inventario, teoría de colas

Los mencionados modelos matemáticos son ampliamente utilizados y estudiados, y se han aplicado y aplican a todos los campos del conocimiento humano. En el caso del campo

forestal, se han utilizado en multitud de aplicaciones como simuladores de crecimiento, estimadores de carbono fijado, etc., ofreciendo la posibilidad de obtención de la información necesaria para poder aplicarla a la gestión forestal mediante metodologías como la *optimización*, que según Romero (1993) se puede subdividir en:

- *Programación multiobjetivo*: se busca la solución óptima del problema para alcanzar la solución más eficiente, por la posible incompatibilidad de alcanzar todos los objetivos marcados.
- *Programación compromiso*: en la cual la solución ideal es inalcanzable, por existencia de conflicto entre objetivos, por lo que la solución que se busca es la más próxima al punto ideal.
- *Programación por metas*: en la cual se busca una solución satisfactoria bajo unos niveles de aspiración definidos de antemano, en un contexto en el que hay recursos limitados, información incompleta, multiplicidad de objetivos o conflicto de intereses.

Para la resolución de estos tipos de programación se utilizan técnicas de resolución iterativas algebraicas, como los métodos *Simplex* o *Dual-Simplex* (cuyo esquema resolutivo se muestra en la Figura 2.1) para programación lineal, lineal mixta y lineal entera. En el caso de las dos últimas, las variables básicas suelen restringirse a números enteros, dificultándose enormemente la resolución del problema, y por ello se recomienda otro tipo de resolución como el *Tabu Search* (Glover 1989, 1990), el *Branch & Bound* (Lawler & Wood 1966) o el *Simulated annealing* (Davis 1987), que si bien no se pueden o deben tomar como óptimas, se acercan mucho a serlo.

Con respecto a las herramientas disponibles para la resolución de problemas algebraicos de optimización en todas sus vertientes, se pueden destacar las siguientes: *Lindo*<sup>®</sup> (Schrage 1991), *MATLAB*<sup>®</sup> (The Mathworks<sup>®</sup> 1998), *SAS/OR*<sup>®</sup> (Hughes & Kearney 2003) y la librería *lpsolve* de R<sup>©</sup> (Berkelaar 2005), siendo esta última una aplicación con licencia *open-source*.

Ejemplos de aplicación de optimización a temas forestales se pueden encontrar en trabajos como, por ejemplo, los de Torres-Rojo & Sánchez-Orois (2005), Pasalodos-Tato & Pukkala (2007) o Díaz-Balteiro & Romero (2008), y en este último se recopilan muchas de las aplicaciones de decisiones multicriterio en el campo forestal.

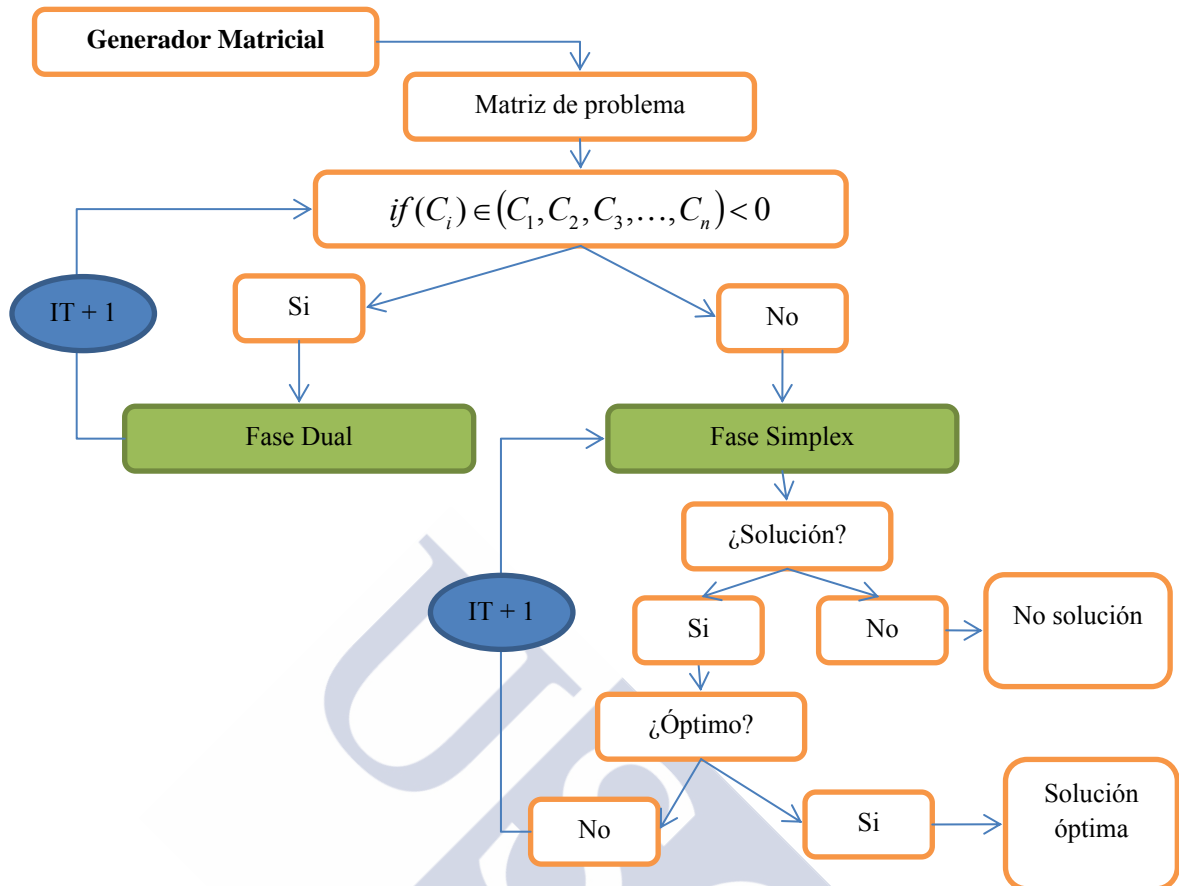


Figura 2.1: Esquema resolutivo del método *Dual-Simplex*.

### 2.3 Metodologías basadas en el análisis cualitativo, psicológico y en la gestión del conocimiento

En el campo de la ingeniería el decisor es una persona que ha sido caracterizada mediante una educación y formación específica y/o multidisciplinar, y que ha adquirido una personalidad gracias a la experiencia en su trabajo cotidiano, lo que le confiere un rango de responsabilidad en las decisiones más importantes que, muchas veces, son avaladas con su firma.

Sin embargo, aunque todos los métodos mencionados proveen una herramienta para la toma de decisiones en base a datos objetivos o cuantificables (por lo general de inventarios), la mayoría de las decisiones incorporan ciertos criterios subjetivos que hacen que el peso final de una decisión recaiga en un decisor o grupo de decisores, que son personas. En este caso aparece el factor humano, o lo que Brans (2002) define como: “*El subjetivo universo del*

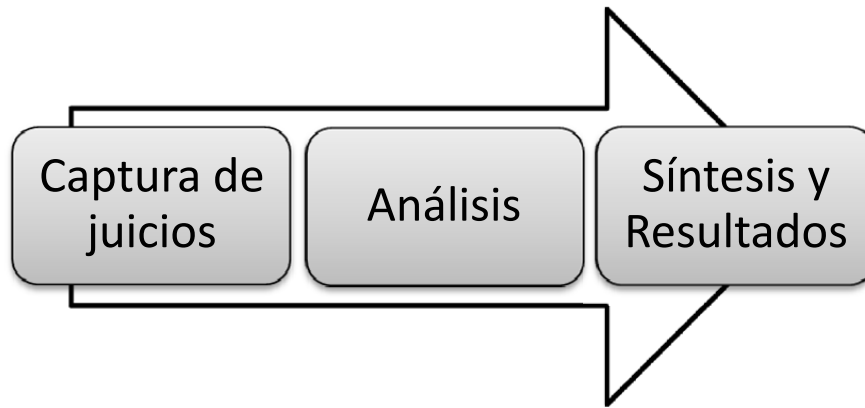
*decisor*”, lo que hace que la psicología deba de ser tomada en cuenta en los procesos de toma de decisión. Por ello, existe la necesidad de introducir conceptos como la *racionalidad*.

El hombre se define a sí mismo como racional, y existen diversos trabajos en los que se estudia este concepto, entre los que destacan los de Herbert A. Simon (1957). Este prestigioso economista basó gran parte de su trabajo en el análisis del funcionamiento organizativo, administrativo y gestor de organizaciones privadas y públicas, estudios que le llevaron a ganar el Premio Nobel de economía en el año 1978, además de ser el precursor de la introducción de la *inteligencia artificial* en la toma de decisiones (Estrada 2007). Simon introdujo el concepto de *racionalidad acotada*, que indica que la mayoría de las personas son sólo parcialmente racionales y son esclavos de sus impulsos emocionales en muchas de sus acciones (Simon 1957), lo que repercute en la objetividad de la toma de decisiones.

También es necesario tener en cuenta nociones como la *incertidumbre*, que lleva asociada el riesgo en la toma de decisiones. Según Kahneman & Tversky (1979) en su “Teoría de la perspectiva” (o en inglés *The prospect theory*), los individuos muestran aversión por el riesgo cuando se evalúan opciones que reportan ganancias, y atracción por él cuando se evalúan opciones que reportan pérdidas.

De acuerdo al fuerte carácter humano de estas metodologías, se han analizado dos grandes grupos de emisión de opiniones. El primero es el de los *Juicios humanos individuales*, en los que se engloban: i) la *Teoría de la decisión del comportamiento* (Edwards 1954; Einhorn & Hogarth 1981); ii) la *Ciencia cognitiva* o estudio de la mente (Gentner 1983); y iii) la *Interacción persona-ordenador*. El segundo grupo es el del *Comportamiento organizativo o de grupo*, que según trabajos como Matsatsinis & Samaras (2001) se puede dividir en: i) *Cara a cara*; ii) *Distanciamiento temporal*; iii) *Estructuras de proceso (democrática o jerárquica)*; y iv) *Negociaciones*, que a su vez se subdividen en: *puesta en común, cooperación o negociación*.

Se puede sintetizar que la idea más general de todas las metodologías anteriores es la de descomponer una compleja decisión multicriterio en una serie de sencillas decisiones o evaluaciones de criterios y alternativas. Según la naturaleza de esa evaluación, es posible diferenciar las *evaluaciones por puntuación* o las *comparaciones por parejas o pareadas*. Ambos métodos de evaluación son la base de numerosas metodologías de toma de decisiones que, en general, siguen la misma rutina que se puede observar en la Figura 2.2.



**Figura 2.2:** Rutina que se sigue en las metodologías de análisis multicriterio basadas en las evaluaciones por puntuación y en las comparaciones pareadas.

Dentro de ese proceso o rutina común a las metodologías de decisión multicriterio basadas en puntuación o en comparación por parejas, es necesario destacar la implicación de la *ciencia cognitiva*, que estudia los procesos mentales de toma de decisiones, de tal manera que la emisión de juicios es, según Blumenthal (1977), “...la identificación de la magnitud de algunos estímulos simples...”. Es decir, lo que se intenta es poder sintetizar esa opinión en una magnitud mediante una emisión de juicios, que casi siempre se suele hacer mediante una escala, para poder analizarla y jerarquizar las alternativas, obteniendo así un resultado que satisfaga el objetivo marcado.

A continuación se describen brevemente algunas de las más importantes metodologías de decisión multicriterio basadas en puntuación o en comparación por parejas.

### **2.3.1 Puntuaciones/ Aditividad**

#### **2.3.1.1 Modelo de la suma ponderada / Modelo del producto ponderado**

El modelo de la suma ponderada (WSM del inglés: *Weighted Sum Model*) y el del producto ponderado (WPM del inglés: *Weighted Product Model*) son considerados los métodos de análisis multicriterio más simples. En ambas metodologías (Triantaphyllou 2000) se da directamente un peso a cada uno de los criterios ( $w_j$ ) y posteriormente se evalúa cada

alternativa ( $A_i$ ) bajo una escala, por ejemplo de 0 a 1, obteniéndose una matriz como la que se muestra en la Tabla 2.2.

**Tabla 2.2:** Matriz de disposición de pesos de los métodos de sumas o productos ponderados ( $w_i$  es el peso del criterio  $i$ , y  $a_{ij}$  es el peso de la alternativa  $i$  bajo la influencia del criterio  $j$ ).

		<i>Criterios</i>				
		<i>Criterio 1</i>	<i>Criterio 2</i>	<i>Criterio 3</i>	...	<i>Criterio n</i>
		$w_1$	$w_2$	$w_3$	...	$w_n$
<i>Alternativas</i>	$A_1$	$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{13}$	...	$a_{1n}$
	$A_2$	$a_{21}$	$a_{22}$	$a_{23}$	...	$a_{2n}$
	...	...	...	...	...	...
	$A_m$	$a_{m1}$	$a_{m2}$	$a_{m3}$	...	$a_{mn}$

La diferencia entre el modelo de la suma y el del producto ponderado radica en las diferentes ecuaciones con las que se obtiene el peso final de cada alternativa (Ec. 2.1 y 2.2).

$$\text{WSM: } A_i = \sum_{j=1}^n w_j a_{ij}, \forall i = 1, 2, 3, \dots, m \quad [\text{Ec. 2.1}]$$

$$\text{WPM: } A_i = \prod_{j=1}^n (a_{ij})^{w_j}, \forall i = 1, 2, 3, \dots, m \quad [\text{Ec. 2.2}]$$

Estas dos metodologías sencillas tienen utilidad en el caso de pequeñas decisiones, ya que el decisor ha de aportar directamente un peso a cada criterio y cada alternativa, aunque a veces puede ser difícil justificar la magnitud de los pesos aportados.

### 2.3.1.2 MAUT (o metodología por clasificación)

El MAUT (*Multi-Attribute Utility Theory*) es un método cardinal (o discreto) de selección del criterio más relevante por clasificación (Keeney & Raiffa 1976, Díaz-Balteiro & Romero 2008), aunque como ya se indicó en el apartado 2.1 algunos autores como Dyer & Forman (1992) lo consideran el campo central de la ciencia de la toma de decisiones, e incluso un sinónimo del MCDM. Metodológicamente, el MAUT divide una decisión compleja en los siguientes pasos:

- a. Identificación de los diferentes atributos o criterios de la decisión.

- b. Descripción de cada uno de los atributos así como de la escala de medida para cada uno (bueno o malo, niveles, etc.).
- c. Dar un peso o efectuar el escalado de cada nivel de atributos o criterios con respecto a su importancia relativa. Este peso puede darse, por ejemplo, mediante una simple escala de 0 a 100.
- d. Cuantificar la importancia entre los diferentes atributos.
- e. Evaluar cada alternativa con respecto a cada atributo.
- f. Combinar todas las puntuaciones entre atributos para calcular el peso de cada alternativa.

Existen algunos ejemplos de aplicación de esta metodología a diversos campos como el de la medicina, como Peacock *et al.* (2007), e incluso se puede encontrar alguna aplicación al campo forestal, por ejemplo Linkov & Ramadan (2004).

Hay que mencionar que autores como Gass (2005) comparan el MAUT con el AHP de Saaty que se comenta en el apartado 2.3.2.4, sin encontrar apenas diferencias entre ellas.

### **2.3.1.3 PAPRIKA**

El método PAPRIKA (*Potentially all pairwise rankings of all possible alternatives*) fue propuesto por Hansen & Ombler (2009) y se basa en valoraciones por puntuaciones, en las cuales sus magnitudes se extraen de comparaciones pareadas según una combinatoria para diferentes grados de dominancia. Este método es utilizado sobre todo para decisiones médicas, como por ejemplo en priorización de acceso a cirugías (no urgentes) en Nueva Zelanda (Taylor & Laking, 2010), o en la jerarquización de prioridades en reumatología, nefrología, gastroenterología y geriatría en Canadá (Barber *et al.* 2011).

Metodológicamente se establece primero una batería de criterios, dividiendo cada uno de ellos en categorías; por ejemplo, tal y como indican Hansen & Ombler (2009), en un ejemplo de tres criterios ( $a$ ,  $b$  y  $c$ ) divididos en dos categorías (1 y 2) cada uno, donde se cumple que  $a_2 > a_1$ ,  $b_2 > b_1$  y  $c_2 > c_1$ . Con esas restricciones se crearía una matriz cuadrada con las siguientes combinaciones de atributos: 111, 112, 121, 122, 212, 211, 221 y 222.

Componiendo la matriz (Tabla 2.3) se produce una comparación pareada. En este caso se dividen los pares entre dominantes (una de las parejas tiene un valor de atributo alto) y no

dominantes, procediéndose a exponer para su evaluación ante un decisor aquellos pares que son no-dominantes. Una vez se tienen las combinatorias, se disponen al decisor las parejas, donde ha de decidirse según su preferencia para la consecución del objetivo.

**Tabla 2.3:** Ejemplo de matriz de parejas dominantes (destacados con el símbolo  $\wedge$ ) y no-dominantes (donde se destacan las parejas de primer grado con un número romano y las de segundo con un asterisco y un número romano) de las combinaciones pareadas en el método PAPRIKA (Fuente: Hansen & Ombler 2009).

	<b>222</b>	<b>221</b>	<b>212</b>	<b>122</b>	<b>112</b>	<b>121</b>	<b>211</b>	<b>111</b>
<b>222</b>		$\wedge$	$\wedge$	$\wedge$	$\wedge$	$\wedge$	$\wedge$	$\wedge$
<b>221</b>			(I) $b_2 + c_1$ vs $b_1 + c_2$	(II) $a_2 + c_1$ vs $a_1 + c_2$	(IV) $a_2 + b_2 + c_1$ vs $a_1 + b_1 + c_2$	$\wedge$	$\wedge$	$\wedge$
<b>212</b>				(III) $a_2 + b_1$ vs $a_1 + b_2$	$\wedge$	(V) $a_2 + b_1 + c_2$ vs $a_1 + b_2 + c_1$	$\wedge$	$\wedge$
<b>122</b>					$\wedge$	$\wedge$	(VI) $a_1 + b_2 + c_2$ vs $a_2 + b_1 + c_1$	$\wedge$
<b>112</b>						(*I) $b_1 + c_2$ vs $b_2 + c_1$	(*II) $a_1 + c_2$ vs $a_2 + c_1$	$\wedge$
<b>121</b>							(*III) $a_1 + b_2$ vs $a_2 + b_1$	$\wedge$
<b>211</b>								$\wedge$
<b>111</b>								

Una vez se establece la preferencia según grados de dominancia entre pares, la rutina de comparación termina cuando el grado es igual al número de categorías. Realizada la comparación, se resuelve el sistema de ecuaciones mediante programación lineal, obteniéndose el peso del atributo.

Esta reciente metodología tiene un punto débil que es preciso tener en cuenta, ya que es muy sensible a la combinatoria. En el ejemplo expuesto, de tan sólo tres criterios y dos categorías para cada criterio, se obtiene una matriz de combinatoria de  $8 \cdot 8$  o, lo que es lo mismo,  $2^3 \cdot 2^3$ , que finalmente se limita a 9 parejas de preferencia después de descartar los pares dominantes que no entran en decisión. Si se aumentasen los criterios a cinco y las categorías a tres, entonces el número de parejas ascendería a 7.380, número que ya es muy elevado y hace inabordable la decisión, y si el número de criterios fuera de seis y se consideraran cuatro categorías, entonces el número de parejas sería 2.295.756, cifra que no requiere comentario.

### 2.3.2 Comparaciones pareadas

Algunas de las más utilizadas metodologías de toma de decisiones multicriterio están basadas en las comparaciones pareadas, esto es, en dividir una decisión compleja en múltiples

comparaciones sencillas o por pares (establecidos mediante combinatoria) de criterios y de alternativas bajo cada criterio. La utilización de comparaciones pareadas se ha justificado por diversos estudios psicométricos, de los cuales Thurstone (1927, 1929) es el precursor (Andrich 1978, Tornimbeni *et al.* 2008). Thurstone indicó en su trabajo que una persona tiene una capacidad muy limitada a la hora de afrontar una decisión con muchos criterios de manera global, pero que sin embargo sí es capaz, con diversa precisión, de realizar una comparación por parejas, esto es, de comparar dos criterios por ejemplo. Además Thurstone asumió que una comparación entre un criterio A y uno B se puede asimilar a una distribución gaussiana aleatoria variable en base a una media y una desviación estándar (Thurstone 1927, Luce 1994).

En la actualidad existen numerosas metodologías de análisis multicriterio basadas en la comparación o evaluación por parejas, todas utilizadas en diversos casos y validadas empíricamente, y en este apartado se van a resumir las más conocidas.

Todas esas metodologías parten de la misma filosofía, que es extraer la opinión de un decisor, traducirlo a un dato numérico que pueda ser analizable y comparable, y así obtener una jerarquía de las alternativas propuestas en cumplimiento siempre de un objetivo marcado. Hay que reseñar que cada metodología utiliza su propia escala y método matemático analítico, haciendo muy difícil la comparación de los resultados de los pesos de cada alternativa entre los métodos.

### **2.3.2.1 Fuzzy**

El método Fuzzy (Zadeh 1965) fue descrito a mediados de la década de los sesenta del pasado siglo por Lofti Zadeh para el análisis matemático en decisiones monocriterio. Se basa en dos conceptos: “*Fuzzy sets*” o conjunto de datos, y “*Fuzzy rules*”, que son las guías que hacen que una alternativa sea elegida en base a las reglas establecidas.

En esta metodología aparece el manejo de números difusos para establecer relaciones triangulares con el objeto de llegar a un grado de acierto para dar solución a una decisión simple. Estos números difusos establecen relaciones que vienen definidos por una tripleta  $(l, m, n)$ , en la cual  $l$  es la media, y  $m$  y  $n$  son los límites superior e inferior respectivamente.

En general, para los números triangulares difusos del tipo  $(l, m, n)$  se define la función de probabilidad del peso de un par  $\mu(x)$ , que suele venir dada por una ecuación de la siguiente morfología (Ec. 2.3):

$$\mu(x) \begin{cases} \mu(x) \leftarrow x = m \\ \frac{x-l}{m-l} \leftarrow l \leq x \leq m \\ \frac{n-x}{n-m} \leftarrow m \leq x \leq n \\ 0 \leftarrow \text{de otra forma} \end{cases} \quad [\text{Ec. 2.3}]$$

La función de probabilidad de pesos en el par muestra un ejemplo de cómo puede ser una función de este tipo, y se pueden encontrar diversos ejemplos de funciones de probabilidad (Iandoli *et al.* 2006). Debido a la dificultad de extraer las ecuaciones de probabilidad del peso de los pares, así como el tiempo que se ha de invertir en ello y su dificultad para ser programado y automatizado en un software, esta metodología no es viable para aplicar en toma de decisiones de carácter general en el ámbito forestal.

Este método puede ser aplicado conjuntamente con la metodología de cálculo del método AHP (ver apartado 2.3.2.4). Así pues, se parte de comparaciones por pares, pero utilizando los números triangulares.

### 2.3.2.2 ELECTRE

El método ELECTRE (Benayoun *et al.* 1966, Roy & Bertier 1973) nació a mediados de la década de los años 60 del siglo XX como un método de análisis multicriterio en búsqueda de soluciones a problemas de la vida cotidiana, en el seno de una empresa consultora denominada SEMA.

Este método se diferencia en las siguientes fases:

- a. Definición del problema: Se marca un objetivo y una batería de criterios y alternativas.
- b. Llenado de la matriz de comparaciones de alternativas frente a criterios.
- c. Construcción de una matriz de concordancia y otra de no concordancia.
- d. Análisis de relaciones.
- e. Jerarquización de alternativas.

El ELECTRE se basa en la estructuración de un problema, en el cual los criterios y las alternativas son evaluados en comparaciones pareadas según las siguientes relaciones:

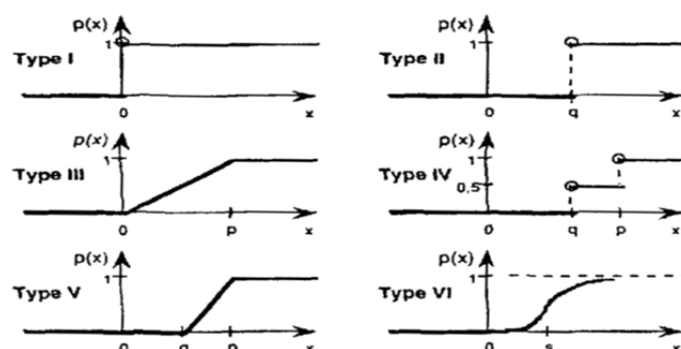
- $aSb$  y no  $bSa$ , i.e.,  $aPb$  ( $a$  es estrictamente preferido a  $b$ ).
- $bSa$  y no  $aSb$ , i.e.,  $bPa$  ( $b$  es estrictamente preferido a  $a$ ).
- $aSb$  y no  $bSa$ , i.e.,  $aIb$  ( $a$  es indiferente a  $b$ ).
- No  $aSb$  y no  $bSa$ , i.e.,  $aRb$  ( $a$  es incomparable a  $b$ ).

### 2.3.2.3 PROMETHEE

El PROMETHEE (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment of Evaluation*) fue desarrollado por Brans, Vincke y Mareschal en la década de los ochenta (Brans *et al.* 1984, 1986, Brans & Vincke 1985).

Esta metodología se basa en la construcción de una jerarquía de todas las alternativas en base a una batería de criterios. Para ello se establece un proceso diferenciado en tres etapas:

- Definición del criterio generalizado: En esta fase se trata de asociar el peso de una alternativa respecto a un criterio a una función  $f_i$ . Bajo esta función se determina la preferencia de una alternativa  $a$  frente a otra  $b$ , pudiéndose calcular la diferencia entre ellas por la resta de los valores de la función para cada alternativa:  $f_i(a) - f_i(b)$ . Según Brans *et al.* (1984) puede haber seis tipos de relaciones, como se muestra en la Figura 2.3. Todas ellas tienen en común un punto  $q$ , que es el umbral de indiferencia, y un punto  $p$  que define el umbral de preferencia. La relación existente entre  $p$  y  $q$  se denomina  $s$ .



**Figura 2.3:** Diferentes tipologías de función de preferencia de un criterio en base a los parámetros  $q$  (de indiferencia) y  $p$  (de preferencia) en la metodología PROMETHEE (tomado de Brans *et al.* 1984).

- b. Construcción del índice de preferencia multicriterio: El proceso global resulta en un índice de preferencia multicriterio  $\pi(a, b)$ , que es el sumatorio del peso en el que una alternativa es preferida a otra (dominante) o no preferida (dominada).
- c. Adopción de la decisión final: Donde se extrae el carácter dominante de una alternativa o su debilidad en el proceso, mediante la comparación de los promedios del índice de dominancia y del índice de dominado. El valor neto de preferencia se obtiene restando el segundo valor al primero. Comparando este índice entre alternativas se establece la jerarquía.

### 2.3.2.4 AHP

El Proceso Analítico Jerárquico o AHP (*Analytic Hierarchy Process*) fue propuesto por T.L. Saaty a finales de la década de los setenta del siglo XX (Saaty 1977, aunque se suele tomar como referencia Saaty 1980). Esta metodología consiste, a grandes rasgos, en la comparación por pares de los criterios de un esquema decisional, así como de las alternativas bajo cada criterio, utilizando para ello una determinada escala (Saaty 1990, 1996b).

Se puede afirmar que el AHP, seguramente por su simplicidad, es el método de toma de decisiones multicriterio más conocido y utilizado en todo el mundo (Díaz-Balteiro & Romero 2008; Eshlaghy & Homayonfar 2011). Por esa razón, este método ha sido y es ampliamente analizado en numerosos estudios, como por ejemplo en los de Carmone *et al.* (1997), Altuzarra *et al.* (2000), Zanazzi (2003) o Schoner & Wedley (2007), y es la base de otras muchas metodologías de toma de decisiones multicriterio. Dentro de la amplia aplicación de la metodología AHP a la toma de decisiones en diversos campos de conocimiento en todo el mundo (véase, por ejemplo, Oddershede *et al.* 2005), también es posible encontrar importantes aplicaciones específicas al campo ambiental o forestal, por ejemplo en Gadow & Bredenkamp (1992), Pukkala & Kangas (1993, 1996), Reyna *et al.* (1999), Kurtilla *et al.* (2000), Schmoldt *et al.* (2001), Coulter *et al.* (2003), Kangas & Kangas (2005) o Kangas *et al.* (2008).

La metodología AHP, además, es la utilizada por gran parte de los programas informáticos con los que trabajan las actuales empresas que se dedican a la consultoría de toma de decisiones. La utilización de software para la aplicación práctica del método AHP resulta muy importante, tanto para facilitar la comparación por pares como, muy especialmente, para

automatizar los procesos matemáticos de cálculo. Existen diversos programas informáticos específicos para aplicar el método AHP (por ejemplo *Expert Choice*<sup>®</sup> 11.5, [www.expertchoice.com](http://www.expertchoice.com)), y en el apartado 2.3.4 se describen las principales características de los más importantes.

En el capítulo 3 se analiza con mayor detalle esta importante metodología, como punto de partida de las propuestas realizadas en la presente tesis.

### **2.3.2.5 ANP**

El ANP o *Analytic Network Process* (Saaty 1996a, 2005) es una generalización del AHP con la que se pueden construir modelos más complejos para aplicar a decisiones que el AHP no puede abarcar.

La diferencia principal del AHP y el ANP es la estructuración del modelo de decisión, que pasa de ser lineal a ser una red, más o menos compleja. Sin embargo, el ANP sigue siendo un método de comparación por pares y hereda también del AHP toda la matemática básica. En esta metodología se crean relaciones entre criterios y alternativas que lo hacen más viable en decisiones con una estructuración más compleja que el AHP.

ANP compone una súper matriz, que es el conjunto ordenado de todas las comparaciones de criterios y alternativas de todos los nudos o relaciones hechas. Un ejemplo de aplicación de esta metodología se puede encontrar en Niemira & Saaty (2004).

### **2.3.3 Otras metodologías**

Se han analizado anteriormente las metodologías más importantes dentro de la toma de decisiones por análisis multicriterio. Sin embargo, existen muchas más, que en ciertos casos surgen de la hibridación de métodos. Entre ellos se pueden enumerar, por ejemplo, los siguientes:

- SWOT análisis, que puede conjugarse con el AHP, pasando a denominarse A'WOT (Kurttila *et al.* 2000, Kangas & Kangas 2005).
- TOPSIS (Hwang & Yoon 1981), que se basa en jerarquizar las alternativas según su distancia geométrica entre la solución ideal y las diferentes alternativas.

- SMART (o *Simple Multi-Attribute Rating Technique*) (Winterfeldt & Edwards 1986), que metodológicamente se basa en los principios del MAUT, en el que se asignan directamente las preferencias en una escala numérica, por ejemplo de 0 a 100.

#### **2.3.4 Herramientas informáticas de apoyo en la toma de decisiones multicriterio por métodos cualitativos**

En la actualidad existen muchas herramientas informáticas para la aplicación de las metodologías expuestas, y muy especialmente del AHP, que es la más utilizada. Un resumen de las características de los aplicativos más importantes encontrados en la bibliografía y en internet se muestra en la Tabla 2.4. Como puede comprobarse, no se ha encontrado ningún software de toma de decisiones multicriterio con licencia *open-source*, lo cual destaca poderosamente con la tendencia actual en internet.



Tabla 2.4: Características de los principales programas informáticos de ayuda a la aplicación de metodologías de decisión multicriterio.

Nombre	Desarrollador	Año ©	País	Metodología	Análisis de sensibilidad	Evaluación en grupo	Plataforma	Precio	Página Web
1000minds®	1000minds	2002 2012	Nueva Zelanda	PAPRIKA	Si	Si	Web y escritorio	Consultar	<a href="http://www.1000minds.com">www.1000minds.com</a>
Analytica®	Lumina Decision Systems	2012	Estados Unidos	Diagramas de decisión y métodos de simulación de Montecarlo	Si	Si	Web y escritorio	Analytica Professional: 1,295.00 \$ Analytica Enterprise: 2,495.00 \$ Analytica Optimizer: 3,995.00 \$	<a href="http://www.lumina.com">www.lumina.com</a>
Criterion DecisionPlus	InfoHarvest Inc.	1996 2012	Estados Unidos	AHP	Si	No	escritorio	Criterion DecisionPlus 3.0: 895.00 \$ Desde 49 €/mes por usuario (WEB) Desde 1.990 €/mes por usuario (escritorio)	<a href="http://www.infoharvest.com">www.infoharvest.com</a>
D-Sight	D-Sight	2009 2012	Bélgica	PROMETHEE y MAUT	Si	Si	Web y escritorio	Desde 49 €/mes por usuario (escritorio)	<a href="http://www.d-sight.com">www.d-sight.com</a>
DecideIT	Preference AB	2002	Suecia	MAUT	Si	Si	Web	Licencia comercial: 1.900,00 € primer año 900,00 € segundo y siguientes	<a href="http://www.preference.se">www.preference.se</a>
Decision Lab	Decision Lab	2012	Reino Unido	-	-	-	-	Consultar (solo consultoría)	<a href="http://www.decisionlab.org.uk">www.decisionlab.org.uk</a>

Decision Lens	Decision Lens	2012	Estados Unidos	AHP, ANP	Si	Si	Web y escritorio	Depende de la organización (consultar)	<a href="http://www.decisionlens.com">www.decisionlens.com</a>
<b>Hiview3</b>	Catalyze Ltd.	2011	Reino Unido	MCDA	Si	No	escritorio	Licencia Standard: Usuario/año: 950.00 £ Renovación: 380.00 £	<a href="http://www.catalyze.co.uk">www.catalyze.co.uk</a>
<b>Equity3</b>	Catalyze Ltd.	2011	Reino Unido	MCDA	Si	No	escritorio	Licencia Standard: Usuario/año: 1,850.00 £ Renovación: 740.00 £	<a href="http://www.catalyze.co.uk">www.catalyze.co.uk</a>
<b>Logical Decisions® Logical Decisions® for groups</b>	Logical Decisions	2012	Estados Unidos	AHP, MAUT	Si	Si (depende de la versión)	escritorio	895.00 \$ más tasas	<a href="http://www.logicaldecisions.com">www.logicaldecisions.com</a>
<b>MakeItRational</b>	MakeItRational	2009 2012	Polonia	AHP	Si	Si (depende de la versión)	Web	Licencia individual: 17.00 \$/mes Pequeños grupos: 37.00 \$/mes Software para empresas: consultar	<a href="http://www.makeitrational.com">www.makeitrational.com</a>
<b>MindDecider Personal MindDecider Team</b>	MindDecider	-	Rusia	AHP	Si	Si (depende de la versión)	escritorio	Licencia individual: 275.00 \$ Grupos: 1,999.00 \$	<a href="http://www.minddecider.com">www.minddecider.com</a>

<b>Rational Focal Point</b>	IBM	-	Estados Unidos	AHP, ANP	Si	Si	escritorio	729.00 \$	<a href="http://www-01.ibm.com/software/awdtools/focalpoint">www-01.ibm.com/software/awdtools/focalpoint</a>
<b>Rational Focal Point Smart Government</b>									
<b>TreeAge</b>	TreeAge Software INC	2012	Australia	AHP	Si	Si	escritorio	TreeAge Pro: Licencia annual: 345.00 \$; Estándar: 1,145.00 \$ TreeAge Pro Excell: Licencia annual: 435.00 \$; Estándar: 1,275.00 \$)	server.treeage.com
<b>Very Good Choice</b>	MVLsoft	2011	Francia	MCDA y ELECTRE	Si	No	escritorio	46,41 € (Añadir para Excell)	<a href="http://www.verygoodchoice-addin.com">www.verygoodchoice-addin.com</a>
<b>PRIOR</b>	INTECSA	1996	España	AHP	Si	No	escritorio	No se comercializa	No posee
<b>Comparion TM</b>	Expert Choice INC	2012	Estados Unidos	AHP	Si	Si	Web	Consultar	<a href="http://www.expertchoice.com">www.expertchoice.com</a>
<b>Expert Choice TM</b>	Expert Choice INC	2012	Estados Unidos	AHP	Si	Si	escritorio	Consultar	<a href="http://www.expertchoice.com">www.expertchoice.com</a>
<b>Super Decisions</b>	Creative Decisions Foundation	2012	Estados Unidos	ANP y AHP	Si	Si	escritorio	Consultar	<a href="http://www.superdecisions.com">www.superdecisions.com</a>

## 2.4 Inteligencia artificial

A finales de la década de los 50, Herbert Simon (1956) ya hablaba de *Inteligencia artificial* en los siguientes términos: “*El análisis que hemos hecho arroja serias dudas sobre la utilidad de la actuales teorías económica y estadística del comportamiento racional como bases para entender las características de la racionalidad humana y de otros organismos. Y sugiere una aproximación alternativa a la descripción del comportamiento racional que está más cerca de las teorías psicológicas de la percepción y la cognición, y que es más acorde con los resultados del comportamiento observado en el laboratorio*”.

Actualmente, se puede dividir esta disciplina en tres grupos:

- *Razonamiento basado en casos*, que consiste en solucionar problemas a partir de soluciones anteriores o ya pasadas, fundamentándose en un *adiestramiento* (Kolodner 1993).
- *Sistemas expertos*, que se fundamentan en la emulación de un razonamiento experto, siempre dentro de un dominio conocido (Hayes-Roth *et al.* 1984). Estos sistemas se basan en la adquisición de conocimiento en un campo dado, para evaluarlo y tomar decisiones en consecuencia.
- *Redes bayesianas*, basadas en la inferencia probabilística, permiten trabajar en situaciones donde existe un número elevado de variables, así como de relaciones complejas entre ellas (López-Puga *et al.* 2007).

## 2.5 Comparación entre metodologías y tendencias actuales

Resulta muy complicado determinar cuál de las metodologías actuales de ayuda a las decisiones multicriterio expuestas es la mejor, ya que depende de qué tipo de decisión se esté tomando, de si se tienen datos o no y de la precisión que se necesite, pero es que, además, como ya se ha comentado, varias de esas metodologías se mezclan o hibridan entre sí.

Sin embargo sí se pueden determinar tendencias de uso de las mismas con trabajos como el de Eshlaghy & Homayonfar (2011), en el que se hace un análisis exhaustivo de las referencias bibliográficas más relevantes desde el año 1999 al 2009 en lo que se refiere a la aplicación de

metodologías de análisis multicriterio. En ese trabajo se concluye que el método AHP destaca de manera muy importante sobre el resto, pues fue utilizado en 142 (un 18%) de las 786 citas bibliográficas analizadas, casi triplicando las cifras obtenidas por las siguientes metodologías más usadas.

Específicamente en el campo forestal, una buena revisión bibliográfica de métodos multicriterio es la de Díaz-Balteiro & Romero (2008), en la que se analizan 255 referencias bibliográficas, de las que fundamentalmente destacan el AHP, la Programación por metas y el MAUT.

Con respecto a la investigación de estas metodologías, quizá la programación por metas es la que menos incertidumbre y/o controversia genere, ya que es un modelo matemático estricto. Sin embargo, el AHP, al ser un modelo cualitativo, y a pesar de ser el método más conocido y aplicado a nivel mundial, genera un enorme inconformismo en lo que se refiere a su investigación, habiendo críticas a su favor y en su contra por ese punto de partida subjetivo que supone la opinión de un decisor.

Con respecto a las perspectivas de futuro en la toma de decisiones, seguramente se enmarquen en la *Inteligencia artificial*, que en cierta medida aglutina las disciplinas cuantitativas de optimización y modelización matemática, pero también las disciplinas cualitativas, ya que el factor humano en la toma de decisiones ha de ser tenido en cuenta si se pretende sostenibilidad económica, social y ambiental. Sin embargo, es necesario perfeccionar las metodologías cualitativas para poder aplicarlas de manera más precisa en la *Inteligencia artificial*.





*La incertidumbre es una margarita cuyos pétalos no se terminan jamás de deshojar*

Mario Vargas Llosa





# Capítulo 3

---

## 3 EL MÉTODO AHP

### 3.1 Introducción

El método AHP (*Analytic Hierarchy Process*) fue desarrollado a finales de la década de los setenta del siglo XX por Thomas L. Saaty, profesor de la universidad de Pittsburg (Estados Unidos), y una buena referencia de esta metodología se expone en Saaty (1980), trabajo que habitualmente se cita como raíz de la misma aunque su punto de partida fuera anterior (Saaty 1977). Saaty ha destacado en el campo de las decisiones multicriterio, no sólo por el desarrollo metodológico y arquitectura del AHP, sino por el del ANP, así como por liderar el equipo de desarrollo del prestigioso aplicativo informático *Expert Choice*<sup>®</sup>, fruto de la experiencia adquirida en el campo de la investigación operativa en la empresa privada y, sobre todo, en organismos gubernamentales de Estados Unidos como los de defensa e inteligencia.

Como ya se ha comentado en el capítulo anterior, el AHP es uno de los métodos más estudiados para la toma de decisiones (Donegan *et al.* 1992; Saaty 2003; Zanazzi 2003; Mendoza & Martins 2006), y además es uno de los más aplicados en multitud de campos y disciplinas, existiendo un amplio abanico de referencias bibliográficas al respecto. Prueba de ello es el trabajo de Eshlaghy & Homayonfar (2011), también referenciado en el capítulo anterior, en el que se estudiaron 786 referencias bibliográficas sobre métodos de toma de decisiones multicriterio publicadas entre 1999 y 2009 en numerosas revistas científicas, resultando que 144 de ellas trataban sobre el AHP, lo que representa un 18,06 % del total, y a gran diferencia de la segunda metodología, que fue el TOPSIS con un 6,87 %. También es de reseñar la celebración, cada dos años, del ISAHP o *International Symposium of the Analytic Hierarchy Process* ([www.isahp.org](http://www.isahp.org)), que reúne los avances y aplicaciones de esta metodología. Pero quizá el dato más relevante es que el software desarrollado por el equipo

de Saaty, denominado *Expert Choice*<sup>®</sup>, tiene más de 20.000 usuarios registrados, repartidos en más de 60 países (Forman & Gass 2001).

## 3.2 Metodología

El AHP es una metodología de análisis multicriterio basada en comparaciones pareadas que se fundamenta en los siguientes cuatro axiomas (Saaty 1986):

1. La propiedad de *juicios recíprocos* ( $a_{ij} = 1/a_{ji}$ , siendo  $a_{ij}$  el valor de la comparación del elemento  $i$  respecto al  $j$ , y  $a_{ji}$  el correspondiente a la comparación del elemento  $j$  respecto al  $i$ ), que es básica para hacer comparaciones pareadas.
2. La *homogeneidad*, que es característica de la capacidad de la gente para hacer comparaciones entre cosas que no son demasiado diferentes con respecto a una propiedad común y, por lo tanto, la necesidad de organizarlos dentro de un orden jerárquico.
3. La *dependencia* de un nivel inferior al nivel superior adyacente.
4. La idea de que el resultado sólo puede reflejar las *expectativas* cuando estas últimas se encuentran bien representadas en la jerarquía.

Estos axiomas se sintetizan en descomponer una decisión compleja o global, en la que intervienen muchos criterios y alternativas, en múltiples decisiones sencillas por pares de elementos. Para ello, Saaty propone una jerarquía o esquema decisional que se resume en los siguientes pasos (Forman & Gass 2001):

1. *Estructuración*: Definir una jerarquía decisional.
2. *Determinación de preferencias* en base a una escala:
  - a. Estimar preferencias de los criterios, comparándolos de dos en dos.
  - b. Estimar preferencias de las alternativas respecto a cada criterio, comparándolas también por pares.
3. *Síntesis* y selección de la mejor alternativa.

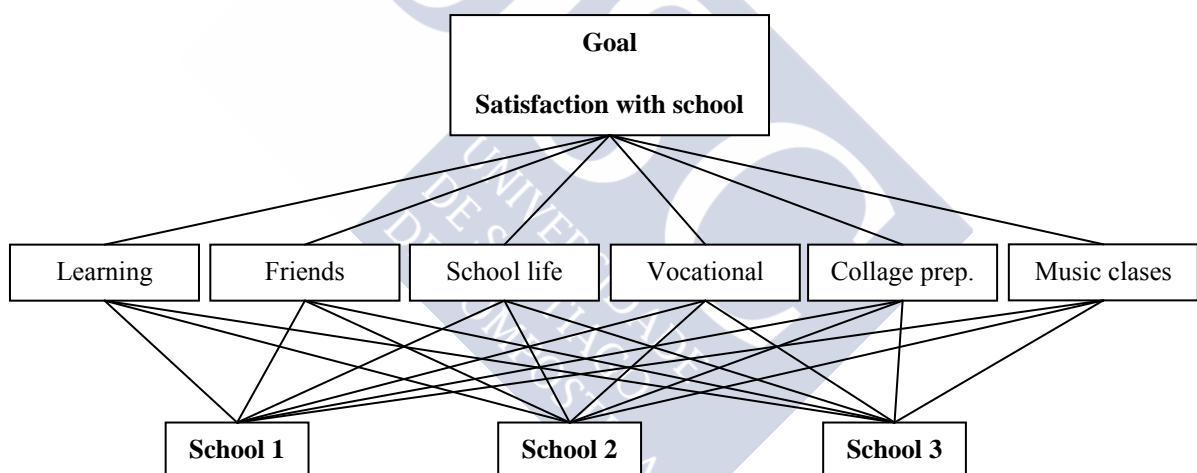
### 3.2.1 Definir una jerarquía decisional

“Para tomar la decisión, debemos conocer el problema” (Saaty 2008). Por ello, este primer punto es, seguramente, el más importante y, en ocasiones, el más laborioso de toda la

metodología, pues repercute en todo el proceso analítico posterior. Consiste en definir el problema y la representación jerárquica específica de lo que se quiere solucionar. La jerarquía ha de ser estructurada en elementos separados en tres niveles (Saaty 1980; 1990):

- *Nivel 1: Objetivo o meta:* lo que se pretende satisfacer o conseguir. Ha de ser definido con exactitud y claridad, sin que dé lugar a dudas o diferencias de interpretación.
- *Nivel 2:* Donde se especifican los *criterios* implicados en la toma de decisiones (estructurados o no, a su vez, en diferentes niveles).
- *Nivel 3:* Establecer todas las *alternativas* posibles que satisfacen el objetivo marcado. Cada una de las alternativas ha de ser una solución viable y factible en la consecución de la meta u objetivo prefijado.

Un ejemplo de la descomposición de una decisión, en base a la jerarquía descrita, se muestra en la Figura 3.1.



**Figura 3.1:** Estructuración jerárquica de la elección de la mejor escuela en base a criterios que buscan la meta de la satisfacción (tomado de: Saaty 2008).

### 3.2.2 Determinación de preferencias

Análiticamente, establecer una preferencia en una comparación pareada es traducir una opinión en una magnitud numérica, que se denomina peso. En este caso hay que diferenciar

entre la evaluación de los criterios y la evaluación de las alternativas bajo la influencia de cada criterio.

### 3.2.2.1 Establecimiento de preferencias y jerarquía de criterios. Escala de comparación

El objetivo del establecimiento de preferencias de los criterios es obtener el peso o importancia que cada uno de ellos tiene en la decisión. Para ello, en el AHP se aplica la comparación pareada con ayuda de una escala discreta de comparación (Saaty 1980), que se muestra en la Tabla 3.1. Mediante dicha escala, un decisor emite un juicio que expresa la preferencia de un criterio en comparación con otro.

**Tabla 3.1:** Escala de comparación propuesta por Saaty (1980) y descripción de sus valores.

Valor	Descripción
1	Misma importancia
3	Importancia débil
5	Importancia fuerte
7	Importancia demostrada sobre el otro
9	Absoluta importancia
2, 4, 6, 8	Valores intermedios entre los anteriores

La citada escala ha sido analizada en numerosos trabajos, como por ejemplo Saaty (1996b), Finan & Hurley (1997), Leskinen & Kangas (1998), Feinstein & Lumley (2001), Laininen (2001), Raharjo *et al.* (2001), Wedley & Choo (2001), Choo & Wedley (2008) o Dong *et al.* (2008), entre otros. Sin embargo, existen otros tipos de escalas como pueden ser la binómica (sí o no), que facilitan el establecimiento de la preferencia en un par pero limitan la información del grado de esa preferencia, u otras con más parámetros. Con respecto a esto, el rango de la escala, así como la cantidad de valores discretos que se dan a elegir al decisor para la emisión de su juicio, están relacionados con la precisión que se le quiera dar al proceso, pero también con la complicación a la hora de emitir el juicio. En este caso, la escala propuesta por Saaty es la más utilizada, aunque también es criticada por algunos autores (por ejemplo, Carmone *et al.* 1997, Osei-Brisson 2006).

A partir de dicha escala, un axioma de este método es el ya comentado de *juicios recíprocos* (Saaty 1980), definido como  $a_{ij} = 1/a_{ji}$ , siendo  $a_{ij}$  el valor de la comparación del criterio  $i$  respecto al  $j$ , y  $a_{ji}$  el correspondiente a la comparación del criterio  $j$  respecto al  $i$ . Sin embargo, este axioma debe ser discutido, ya que en una emisión de juicios por comparación de pares influyen y actúan muchos y diversos factores (entre ellos los emocionales), que pueden distraer la atención del decisor, y esto resulta especialmente importante en aquellas decisiones en las que intervienen gran cantidad de criterios y/o alternativas, que son largos y tediosos. Por todo ello, puede existir cierta variabilidad temporal en la opinión de un decisor, lo que significa que si se evalúan  $a_{ij}$  y  $a_{ji}$  en diferentes estadios del proceso puede resultar que  $a_{ij} \neq 1/a_{ji}$  por la pérdida progresiva de atención y concentración del decisor. Además, otro importante factor que influye en el incumplimiento del axioma de *juicios recíprocos* es la naturaleza subjetiva de ciertos criterios, que se ven condicionados por las comparaciones anteriores y posteriores, de manera especial en aquellos procesos de decisión que duran mucho tiempo (Mellers & Schwartz 1998, Martínez-Selva *et al.* 2006). A este respecto, Carmone *et al.* (1997) y Altuzarra *et al.* (2000) proponen las matrices incompletas como solución cuando hay muchos pares de comparación, y Paulson & Zahir (1995) analizan las consecuencias de juicios inciertos en la inconsistencia de la decisión (ver siguiente apartado 3.2.2.2). Por otra parte, en otro tipo de escalas este axioma de *juicios recíprocos* ha de ser revisado (Vachajitpan 2004).

En cualquier caso, la comparación pareada utilizando la escala correspondiente ha de establecerse entre todos los criterios que forman parte de la decisión, de tal manera que el resultado de todas las combinaciones posibles da como resultado la matriz de comparaciones  $A$  (Ec. 3.1), de tamaño  $n \times n$ , siendo  $n$  el número de criterios, y en la que, lógicamente, la diagonal está compuesta por valores iguales a la unidad:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad [\text{Ec. 3.1}]$$

Una vez completa la matriz de comparaciones se normaliza por columnas, lo que conlleva la consecuente pérdida de reversibilidad del proceso, como se contempla en Barzilai & Golany (1994). Posteriormente se promedia aritméticamente por filas, y para ello algunos autores,

como Barzilai *et al.* (1987) o Ishizaka & Labib (2009), recomiendan la media geométrica frente a la aritmética. Tras normalizar y promediar se obtiene  $W$ , también llamado autovector principal (Saaty 2003), de tamaño  $1 \times n$ , que supone el peso obtenido para cada criterio.

### 3.2.2.2 Inconsistencias

Según Saaty (1990), se pueden establecer matemáticamente unos grados de inconsistencia, medidos por los valores del  $CR$  o *Consistency Ratio*, que indican si la matriz de comparaciones muestra unas calificaciones lógicas o no. Esta inconsistencia se calcula considerando la valoración de la homogeneidad de las matrices normalizadas con las matrices de comparación, mediante la Ecuación 3.2:

$$A \cdot W = n \cdot W \quad [\text{Ec. 3.2}]$$

donde  $n$  es el número de elementos comparados,  $W$  es el autovector principal y  $A$  es la matriz de comparaciones. Por otra parte, se tiene que:

$$\sum_{i=1}^n \left( \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot W_j \right) = n_{\max} \cdot \sum_{i=1}^n W_i \quad [\text{Ec. 3.3}]$$

donde  $a_{ij}$  es cada uno de los valores de la matriz de comparación. El valor  $n_{\max}$  se extrae de multiplicar matricialmente la matriz de comparaciones  $A$  con el autovector  $W$ , con lo que se obtiene una nueva matriz columna  $A \cdot W$ . De esta manera,  $n_{\max}$  es el resultado de promediar los elementos de la matriz  $A \cdot W$  una vez que se dividen por su homónimo en la matriz  $W$ . Conocidos  $n$  y  $n_{\max}$  se calcula el llamado índice de consistencia  $IC$  por la Ecuación 3.4:

$$IC = \frac{n_{\max} - n}{n - 1} \quad [\text{Ec. 3.4}]$$

Por otra parte, se obtiene el  $IA$ , que es un índice de comparación que depende del número de elementos comparados  $n$ , según la Ecuación 3.5:

$$IA = \frac{1,98 \cdot (n - 2)}{n} \quad [\text{Ec. 3.5}]$$

Conocidos  $IC$  e  $IA$ , se obtiene  $CR$  dividiendo uno entre otro, tal y como se expone en la Ecuación 3.6:

$$CR = \frac{IC}{IA} \quad [\text{Ec. 3.6}]$$

Siguiendo a Saaty (1990), Zeshui & Cuiping (1999) o Raharjo *et al.* (2001), si  $CR$  es mayor de 0,10 entonces la matriz se considera inconsistente, y será consistente si  $CR$  es igual o menor de 0,10.

Cuando una evaluación es inconsistente, Saaty (1990) recomienda revisar los valores de las comparaciones con el fin de minimizar el ratio, Aguaron *et al.* (2003) proponen el estudio de intervalos consistentes mediante una herramienta que han denominado CSI, y Cao *et al.* (2008) indican una aproximación por medio de un modelo heurístico de la matriz de comparaciones  $A$  para llegar a la consistencia.

Sin embargo, otros autores exponen que este tipo de consistencias *no son interpretables*, y proponen la aplicación de la programación lineal (Bryson 1995, Escobar & Moreno-Jiménez 2002, Osei-Brison 2006). En ese caso, según Romero (1993), la obtención de los pesos se haría a través de la resolución del sistema de ecuaciones que se generan en la comparación pareada. Así, por ejemplo, si se considera la siguiente matriz (Ecuación 3.7):

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 3 & 5 \\ 1/3 & 1 & 4 & 1 \\ 1/3 & 1/4 & 1 & 1 \\ 1/5 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad [\text{Ec. 3.7}]$$

El sistema de ecuaciones a solucionar sería el expuesto en la Ecuación 3.8:

$$\begin{cases} W_1 - 3W_2 = 0 \\ W_1 - 3W_3 = 0 \\ W_1 - 5W_4 = 0 \\ W_2 - 4W_3 = 0 \\ W_2 - W_4 = 0 \\ W_3 - W_4 = 0 \end{cases} \quad [\text{Ec. 3.8}]$$

Una solución trivial del sistema de ecuaciones es cuando  $W_1=W_2=W_3=W_4=0$ , ya que el número de incógnitas en este caso es igual, y no menor, que el rango de la matriz. Romero (1993) propone la búsqueda de una solución aproximada mediante programación lineal, introduciendo en el sistema cierta holgura, la cual ha de minimizarse, con lo que se genera el siguiente programa (Ecuación 3.9):

Minimize

$$n_1 + p_1 + n_2 + p_2 + n_3 + p_3 + n_4 + p_4 + n_5 + p_5 + n_6 + p_6$$

Subject to

$$W_1 - 3 W_2 + n_1 - p_1 = 0$$

$$W_1 - 3 W_3 + n_2 - p_2 = 0$$

$$W_1 - 5 W_4 + n_3 - p_3 = 0$$

$$W_2 - 4 W_3 + n_4 - p_4 = 0$$

$$W_2 - W_4 + n_5 - p_5 = 0$$

$$W_3 - W_4 + n_6 - p_6 = 0$$

$$W_1 + W_2 + W_3 + W_4 = 1$$

$$W_1 \geq 0$$

$$W_2 \geq 0$$

$$W_3 \geq 0$$

$$W_4 \geq 0$$

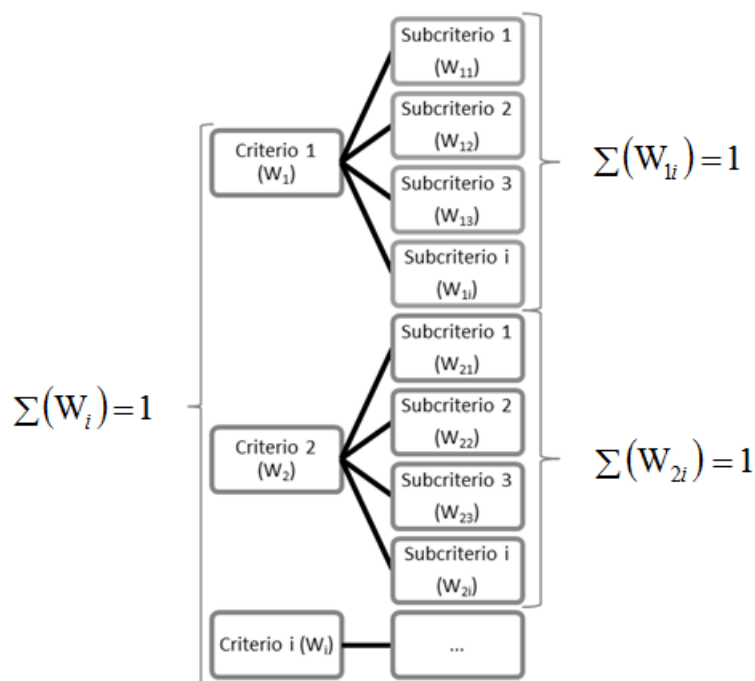
[Ec. 3.9]

Solucionando el programa (Ecuación 3.9), por ejemplo con Lingo, los pesos ( $W$ ) obtenidos son:  $W_1= 0,577$ ,  $W_2= 0,192$ ,  $W_3= 0,115$  y  $W_4 = 0,115$ , resultando un objetivo de 0,577. Por otra parte, los valores obtenidos en la resolución propuesta por Saaty (1980, 1990) son:  $W_1 = 0,516$ ,  $W_2 = 0,235$ ,  $W_3 = 0,116$  y  $W_4 = 0,133$ , con un valor de CR = 0,097, siendo en este caso consistente la decisión. Como se puede observar, los resultados obtenidos son muy parecidos en magnitud en los dos casos.

### 3.2.2.3 Proceso en un esquema de criterios bifurcados

Cuando en una decisión se incorpora un esquema de criterios bifurcados, agrupados o en varios niveles, esto es, cuando hay criterios que se dividen a su vez en subcriterios en uno o varios subniveles (Figura 3.2), entonces se ha de operar igual que en el caso anterior, pero aplicando la metodología a los subgrupos de criterios formados, obteniéndose un peso en

tanto por uno con respecto a cada criterio raíz de ese subgrupo, así como su inconsistencia. Para obtener el peso absoluto de cada subcriterio debe ponderarse por el peso del criterio raíz.



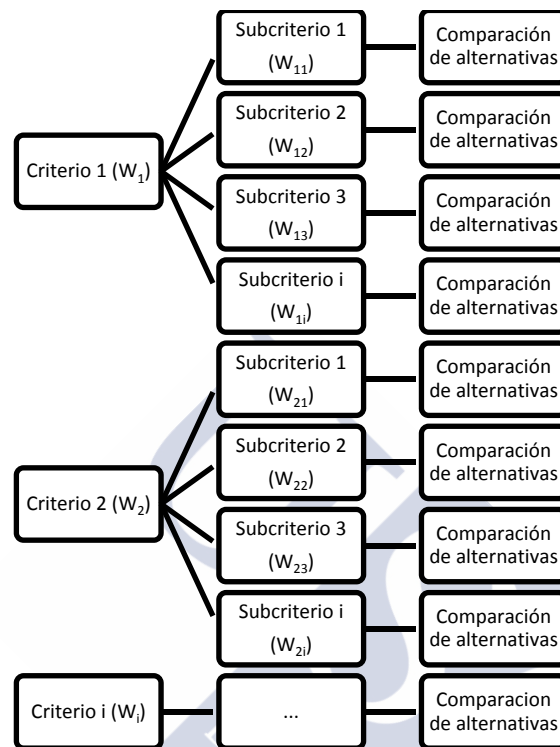
**Figura 3.2:** Esquema de criterios bifurcados: agrupaciones de criterios y subcriterios (en este caso con dos niveles) para la realización de combinatorias y obtención de pesos ( $W_i$ ).

#### 3.2.2.4 Establecimiento de preferencias y jerarquía de alternativas bajo un criterio

En esta fase se procede igual que en la anterior, comparando ahora las alternativas también de dos en dos, pero bajo cada uno de los criterios, y utilizando la misma escala. Se obtiene así un número de matrices de comparación de alternativas igual al número de criterios del nivel segundo ( $n$ ), y de tamaño  $1 \times m$ , siendo  $m$  el número de alternativas. En estas matrices también se procede a evaluar sus autovectores, que son las calificaciones de cada alternativa bajo cada criterio, por lo que se puede construir una matriz de tamaño  $n \times m$  con todos ellos, que también se normaliza.

En esta fase es posible también estimar el grado de inconsistencia de la matriz de pesos de las alternativas, de forma similar a lo comentado anteriormente.

Cuando el esquema de criterios está bifurcado, es decir, cuando los criterios se organizan en dos o más niveles, las alternativas son evaluadas para cada uno de los criterios del último subnivel, esto es, para los criterios terminales de las bifurcaciones, tal y como se puede ver en la Figura 3.3.



**Figura 3.3:** Comparación de alternativas bajo los subcriterios del último nivel del esquema bifurcado de criterios de una decisión genérica.

### 3.2.3 Cálculo del peso final de las alternativas

Como finalización del proceso analítico, se multiplica la matriz de pesos de las alternativas (de tamaño  $n \times m$ ) por el autovector principal de los pesos de los criterios  $W$  (de tamaño  $1 \times n$ ), y se obtiene la matriz resultado de los pesos globales de cada una de las alternativas (de tamaño  $1 \times m$ ), que representa el resultado final del proceso de decisión.

Este resultado se puede complementar con un análisis de sensibilidad, que permita observar cómo se modifican los resultados si se varían los pesos de los criterios. Para ello existen dos posibilidades:

- *Método del reparto proporcional*: Es el que habitualmente se utiliza. Consiste en obtener una relación simple a partir de la exclusión de alguno de los pesos de la matriz. De esta manera, los pesos de los demás criterios cambian de manera inversamente proporcionalmente a su magnitud.
- *Método del reparto equitativo*: Consiste en repartir la variación de un criterio entre todos los demás en la misma magnitud. Por ejemplo, si un criterio sube el 30%, los demás criterios reducen su peso en una magnitud que, en este caso, es:  $30/(n-1)\%$ .

### 3.3 El AHP en decisiones grupales

Cuando en una decisión intervienen dos o más decisores, la variabilidad de opinión de cada uno de ellos ha de tenerse en cuenta. En esos casos de utilización del AHP en decisiones grupales se han de seguir los siguientes procedimientos: *consenso*, *voto* y *compromiso* (Dyer & Forman 1992), aunque otros autores como Espinasse *et al.* (1997) proponen: *evaluación individual*, *evaluación colectiva* y *negociación*.

El *consenso* (Ngwenyama *et al.* 1996) surge de poner a todos los decisores a debatir la estructura de la decisión, y posteriormente a emitir juicios en conjunto. Sin embargo, cuando no hay puntos en común se pasa al *voto* individual y al *compromiso* y síntesis grupal de datos (Gass & Rapcsák 1998). En el caso de que no se llegue a un acuerdo unánime, se procede a realizar la media geométrica de los pesos obtenidos por cada decisor individualmente (Lai *et al.* 2002, Dong *et al.* 2010).

Es obligado también introducir el concepto de *manipulación* en la toma de decisiones que subyacen de las relaciones emocionales, laborales, etc. de los componentes del grupo decisor. La manipulación en la toma de decisiones ha de ser tenida en cuenta, pero es difícilmente cuantificable, ya que existen varios tipos de manipulación que se pueden aplicar de múltiples formas (Handelman 2009). Esta manipulación puede variar el peso que cada decisor tiene en la toma de la decisión.

### 3.4 Análisis DAFO

Las *fortalezas* del método AHP son las siguientes:

- Fácil aplicación a cualquier caso: esta metodología es utilizada como apoyo a la toma de decisiones difíciles en muchos campos, y así lo aplican, por ejemplo, empresas farmacéuticas o gobiernos de todo el mundo.
- Fácil utilización del método en encuestas, puesto que las comparaciones se pueden establecer en una línea de texto.
- Cálculo matricial sencillo para la obtención de las jerarquías.
- Fundamentos teóricos axiomáticos: toda la metodología se basa en axiomas lógicos demostrados empíricamente.
- Estructuración y jerarquización del problema justificadas en base a un objetivo.

Esta metodología, sin embargo, tiene ciertas *debilidades*, que se resumen en:

- Posible incumplimiento del axioma de *juicios recíprocos*, base de la comparación por pares, especialmente en aquellas decisiones en las que intervienen muchos criterios y/o alternativas.
- Teórica rigidez de las escalas: Las escalas propuestas han de ser rígidas, esto es, el decisor ha de tener la misma consciencia de su magnitud en todo el proceso, desde el primer par de calificación hasta el último; sin embargo, con el paso de las evaluaciones esta consciencia podría variar.
- Número de pares a evaluar: La ecuación que dicta el número de pares que han de ser evaluados de manera global en todo el proceso es (Ecuación 3.10):

$$[n \cdot (n-1)]/2 + n \cdot [m \cdot (m-1)]/2 \quad [\text{Ec. 3.10}]$$

siendo  $n$  el número de criterios y  $m$  el número de alternativas. Así, por ejemplo, en una decisión con 10 criterios y 10 alternativas deben de ser evaluados 495 pares. Esto indica que este método es muy sensible al número de criterios y de alternativas, aumentando de forma casi exponencial el número de pares a comparar cuando lo hacen el número de criterios y de alternativas, lo que dificulta el proceso de la toma de decisión.

- Dificultad para conocer el error o la inconsistencia de las matrices, además de su sensibilidad a la inconsistencia, es decir, un simple par mal calificado puede hacer inconsistente toda una matriz y, por tanto, la decisión final.

Respecto a las *amenazas* del AHP:

- La utilización de las escalas suscita diversa controversia, ya que a veces es difícil establecer la preferencia entre dos criterios.
- Cada vez las decisiones importantes incorporan más criterios y/o alternativas (por ejemplo, en gestión forestal deben considerarse diferentes criterios ambientales, sociales, económicos y técnicos conjuntamente), lo que desemboca en que el número de pares a comparar pueda llegar a ser inviable.
- Utilizándolo de manera inadecuada, el AHP puede convertirse en un método para justificar “científicamente” ciertas decisiones preestablecidas.

Finalmente, las *oportunidades* que brinda esta metodología son:

- Es uno de los métodos más sencillos de toma de decisiones multicriterio, pero puede aplicarse a aquellos casos que, por su complejidad, no pueden ser solucionados por otro tipo de modelos matemáticos.
- Es seguramente una de las metodologías que más se ha utilizado en todos los campos de conocimiento y en todo el mundo, y gracias a ello existe mucha experiencia en su aplicación.
- Ha sido objeto de numerosos estudios, y existen diversas modificaciones o adaptaciones que pretenden mejorar sus debilidades.
- Es posible desarrollar programas informáticos que faciliten la aplicación del método AHP, ayudando notablemente en el proceso de comparación por pares y automatizando todos los cálculos necesarios.

### **3.5 Síntesis: Limitaciones del método AHP**

A pesar de sus potencialidades, es posible concluir que el método AHP posee una serie de limitaciones, que se enumeran y comentan a continuación.

### **3.5.1 Emisión de juicios**

El axioma de *juicios recíprocos* en las comparaciones pareadas, que es la base del método AHP, no siempre se cumple, debido a la naturaleza subjetiva de ciertos criterios y a los sesgos cognoscitivos que pueden aparecer en el proceso de emisión de juicios, especialmente en las decisiones largas en las que intervienen gran cantidad de criterios y/o alternativas.

### **3.5.2 Número de criterios/alternativas**

La metodología AHP es muy sensible al número de criterios y de alternativas con respecto al número de pares que es necesario evaluar, lo que está directamente relacionado con el tiempo que un decisor tiene que invertir para terminar una evaluación y con la consecuente posibilidad de pérdida de concentración y de consistencia del resultado final.

El hecho de establecer esquemas bifurcados de criterios y subcriterios en varios niveles ayuda a minimizar el número de pares a evaluar gracias a la posibilidad de analizarlos por grupos (por criterios o subcriterios raíz). Sin embargo, cuando un criterio raíz tiene un comportamiento subjetivo muy acusado, interesa que la dispersión del peso sea transferida a los subcriterios en los que se divide.

### **3.5.3 Utilización de la escala**

La utilización de la escala propuesta por Saaty (1980,1990) suscita diversa controversia, ya que a veces es difícil establecer la preferencia entre dos criterios, sobre todo cuando la escala está dividida en muchas posibles opciones para elegir. Por otra parte, la utilización de escalas, como la propuesta por Saaty, conlleva la aparición de inconsistencias, medidas mediante un indicador que cuantifica la homogeneidad de la matriz de comparaciones, pero este indicador tiene difícil interpretación (Bryson 1995) ya que se extrae a nivel de conjunto de criterios, por lo que difícilmente se puede asociar a un criterio o a una alternativa.

### **3.5.4 Descartar criterios/alternativas de un esquema ya evaluado**

Cuando se realizan varias repeticiones de un esquema de criterios, puede resultar que uno o varios de ellos muestren una alta dispersión en el valor de sus pesos, o que sus inconsistencias en las sucesivas repeticiones no disminuyan hasta el límite de ser consistentes. Matemáticamente, esta operación se realiza haciendo cero el valor de esos criterios y

repartiendo sus pesos iniciales entre los otros. Sin embargo, cabe pensar que en algunos casos no sea así, ya que un decisor puede variar la opinión con respecto a un criterio dependiendo de con qué se compare, por lo que en esos casos se recomienda repetir toda la decisión.

Resulta conveniente, por tanto, realizar unas pruebas de calificación iniciales para determinar un esquema de criterios útiles, ya que sería inservible manejar criterios que muestren inconsistencia.

Todo lo indicado sobre la posibilidad de descartar criterios de una decisión ya evaluada es también válido para las alternativas.

### ***3.5.5 Introducir criterios/alternativas en un esquema ya evaluado***

Introducir un criterio nuevo en una decisión que ya ha sido evaluada resulta todavía más complicado que descartarlo, debido a la irreversibilidad de las comparaciones por pares de la metodología AHP. Podría ser factible introducir ese nuevo criterio en la matriz de comparaciones sin normalizar, pero en ese caso también habría que discutir si la valoración de los pesos de los demás criterios variaría proporcionalmente al introducir otro nuevo.

Además, a nivel de software, se hace necesario guardar la menor información posible en las bases de datos, para favorecer la rapidez en su uso, por lo que guardar los datos de las matrices de comparación resulta poco operativo. Por tanto, y como en el caso anterior, se recomienda realizar una evaluación inicial para evaluar si el esquema de criterios y alternativas propuesto es acorde a la decisión a tomar.

### ***3.5.6 Idoneidad de las decisiones grupales***

En un contexto ideal, que puede ser el propuesto por Simon (1957), en el que un decisor puede tomar una decisión sin estar comprometido por un estatus basado en una jerarquía piramidal, tendría sentido la utilización de las decisiones grupales por consenso. Sin embargo, es complicado suponer que en una decisión grupal presencial no existan relaciones emocionales entre los decisores que puedan distorsionar el proceso, y lo más habitual es que, como indica Weber (1944), la opinión de las personas con mayor categoría prime sobre la de sus subordinados, pudiendo entonces, aunque no sea directamente, influenciar sobre las mismas. Además, pueden surgir otro tipo de influencias, controladas o no controladas, dando

como resultado de todo ello que la decisión se base en la opinión sesgada o dirigida de un grupo de decisores.





*La inteligencia consiste no sólo en el conocimiento, sino también en la  
destreza de aplicar los conocimientos en la práctica*

Aristóteles





# Capítulo 4

---

## 4 DESARROLLO DE SOFTWARE PROPIO PARA LA APLICACIÓN DEL AHP

### 4.1 Introducción

La programación informática es una herramienta en continua y constante evolución, y constituye una herramienta útil y necesaria para el desarrollo de software, puesto que ayuda, entre otros, al procesado de gran cantidad de datos, a la automatización de cálculos complejos y a la exposición ordenada de resultados.

La creación de herramientas informáticas de apoyo en decisiones, así como las de aplicación de metodologías complejas, resulta factible con los avances informáticos de hoy en día, ya que la capacidad matemática de computación actual permite la solución de problemas complejos en un corto periodo de tiempo.

El desarrollo de un software propio para la aplicación de la metodología AHP, denominado MPC<sup>®</sup> (Método de los Pares de Comparación), ha estado motivado por la necesidad de contar con un programa en español competitivo a nivel de análisis, cálculo y base de datos respecto a los actualmente existentes de pago en el mercado (ver apartado 2.3.4), con el objetivo de fomentar la investigación en este tipo de metodologías de análisis multicriterio, en su análisis de sensibilidad y en su aplicación, especialmente, al campo forestal. Por ello, el desarrollo de un nuevo programa informático se justifica por los siguientes motivos:

- El software disponible supone un coste elevado de licencias de uso y desarrollo, lo que significa que a la hora de modificar o proponer mejoras se entraría en conflicto con licencias, que en todos los casos son de software propietario.
- Aunque la aplicación a un caso concreto pudiera desarrollarse en una hoja de cálculo, ésta solo valdría para ese caso en concreto, y sería complicado de generalizar para otros casos.

- La necesidad de hacer un estudio de manera pormenorizada del AHP, a nivel cálculo y a nivel interfaz, supone contar con un programa propio para la aplicación de la metodología y, con ello, tener un banco de pruebas para detectar errores y promover mejoras, así como para estudiar su aplicabilidad al campo forestal.

En la actualidad existen numerosos lenguajes de programación para el desarrollo de herramientas informáticas, pero quizá uno de los más utilizados, por su sencillez, sea el VB.NET<sup>®</sup>, que puede ser también utilizado en numerosas aplicaciones ofimáticas como Office de Microsoft<sup>®</sup> o paquetes libres como Open Office<sup>®</sup>. Además, existen editores libres para poder crear programas externos o ejecutables, como por ejemplo el Sharp Develop<sup>®</sup>.

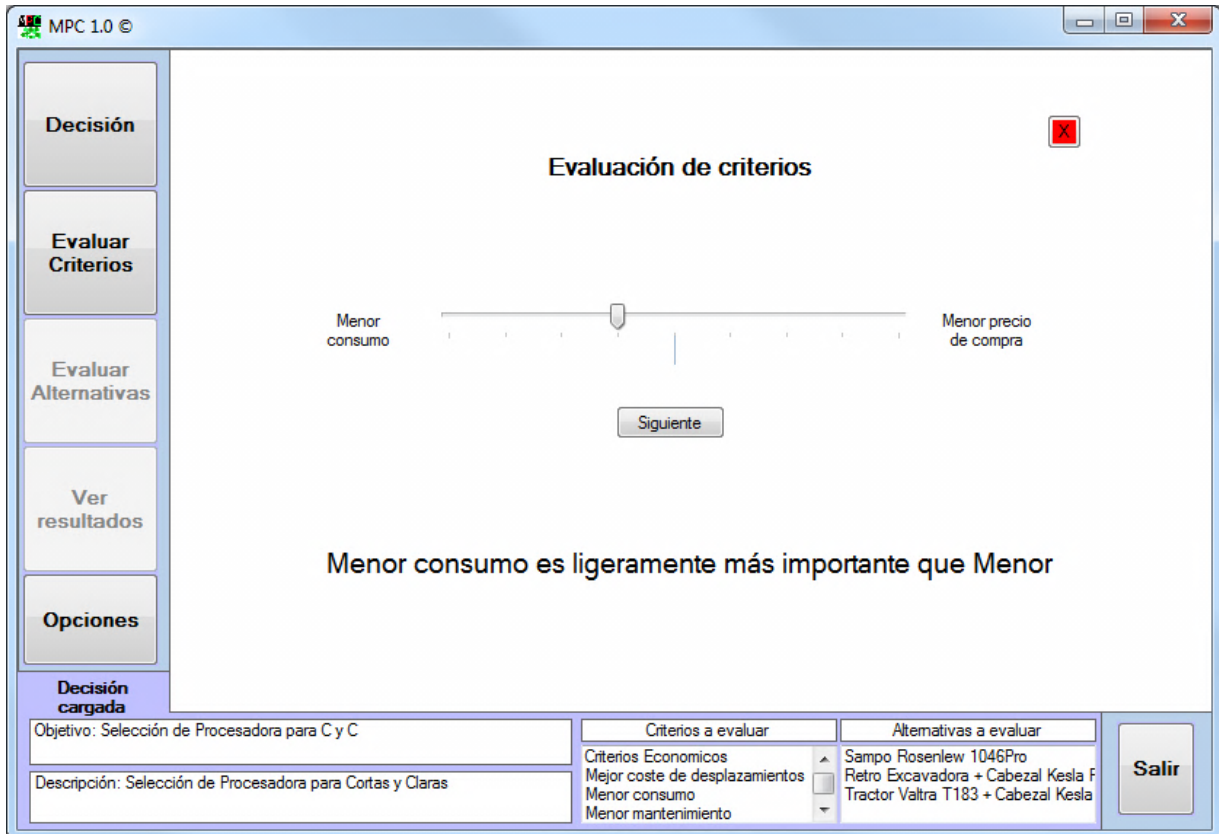
Aplicando una metodología de programación ordenada se pueden llegar a materializar las ideas surgidas en un proceso creativo, desembocando todo ello en la innovación de aplicativos que ayudan a mejorar las herramientas informáticas en materia de toma de decisiones complejas (incluyendo su aplicación a la gestión forestal). Por ello, se ha tomado la decisión de desarrollar un algoritmo con una interfaz sencilla, que posteriormente se ha mejorado en sucesivas versiones, materializadas en la serie de software MPC<sup>©</sup> 1.0, 2.0 y 2.01 MEX que se comenta a continuación.

### 4.2 MPC<sup>©</sup> 1.0

La primera versión desarrollada de software de ayuda a la toma de decisiones multicriterio, que se ha denominado MPC<sup>©</sup> 1.0 (Pérez-Rodríguez 2009), se ha basado en la implementación de la metodología AHP tradicional (Saaty 1980) con la finalidad de aplicarla a decisiones de asesoramiento relativamente sencillas, en las que se engloben varios criterios en un esquema de un único nivel, y en las que haya más de una alternativa.

El proceso de desarrollo del software ha contemplado en primer lugar el diseño de un entorno visual o formulario, que se ha hecho bajo unas pautas de percepción y ergonomía de los componentes u objetos, con el objetivo de facilitar su uso. Una vez desarrollado el entorno visual (Figura 4.1), se han creado las variables y matrices de tipo *single* (o número de precisión simple) e *integer* (o números enteros de precisión sencilla para índices), entre otros,

que soportan los datos de todo el proceso. Por último, se han implementado todas las rutinas de cálculo matricial por medio de módulos de comandos para la automatización de todos los pasos del AHP a nivel matricial: sumas, restas y producto de matrices, extracción de normales y autovectores, y cálculo de inconsistencias.



**Figura 4.1:** Ventana principal del programa MPC<sup>®</sup> 1.0 exponiendo un ejemplo de la comparación de dos criterios.

Esta primera versión ha sido diseñada para que, cuando el usuario introduzca los criterios y las alternativas, el software se encargue de manera automática de exponer directamente los pares a evaluar en la interfaz o panel principal de trabajo. Esta automatización se realiza mediante combinatoria, secuenciándose todos los pares necesarios para completar la matriz de comparaciones y poder operar con ella. El proceso de automatización permite focalizar la atención del decisor en el par que se está calificando, puesto que permite visualizar un par de manera independiente en pantalla, sin necesidad de elegir en la matriz qué par va a ser calificado en cada momento. Además, en la exposición de pares en el panel de evaluación se

ha introducido la aleatorización de exposición de elementos a izquierda y derecha. Para ello se ha utilizado el siguiente comando:

```
If Rnd() - Rnd() > 0 Then
    aleatorio = 1
Else
    aleatorio = 0
End If
```

Como resumen de la primera versión, destacan las siguientes características:

- a) Interfaz completamente en español.
- b) Posibilidad de evaluación de decisiones de hasta 15 criterios y 15 alternativas.
- c) Bases de datos para almacenar decisiones jerarquizadas (meta, criterios y alternativas).
- d) Creación sencilla de informes en texto y posibilidad de exportar los resultados a hojas de cálculo (por ejemplo, a Microsoft Excel<sup>®</sup>).

El programa MPC<sup>®</sup> 1.0 puede descargarse gratuitamente de la Web del grupo de investigación *Unidade de Xestión Forestal Sostible* (UXFS) de la Universidad de Santiago de Compostela (<http://www.usc.es/uxfs/>).

### **4.2.1 Aplicación del programa MPC<sup>®</sup> 1.0: Priorización de desbroce**

En este apartado se muestra una aplicación práctica de utilización del programa MPC<sup>®</sup> 1.0, que corresponde a un asesoramiento sencillo a un propietario forestal que posee seis parcelas arboladas y debe desbrozarlas por razones de carácter legal, teniendo en cuenta que, debido a limitaciones económicas, solo puede desbrozar dos parcelas al año (Pérez-Rodríguez 2009).

Se busca, por tanto, establecer la prioridad de las parcelas para ser desbrozadas, minimizando el riesgo de pérdidas por fuego y de una posible sanción administrativa por abandono de las fincas en el caso de un incendio forestal. Para aplicar el método AHP es preciso, como ya se comentó, establecer una jerarquía en tres niveles (ver apartado 3.2.1).

El primer nivel está compuesto por el objetivo que se busca, que en este caso es: “establecer la prioridad de desbroce en seis parcelas de monte arbolado”.

El segundo paso consiste en establecer los criterios que han de ser evaluados (que forman el segundo nivel de la jerarquía), y que se van a dividir en cuatro tipologías: económicos,

ambientales, sociales y técnicos. Sin embargo, debido a la limitación de la versión 1.0 de no poder establecer esquemas bifurcados de criterios, éstos han de ser evaluados en su totalidad en un mismo nivel. Los criterios que se han tenido en cuenta en esta aplicación práctica son:

- *Criterios económicos:*
  - *Posibilidad de sanción administrativa:* según la normativa actual aplicable, la Ley 3/2007, de 9 de abril, de prevención y defensa contra los incendios forestales de Galicia, es obligatorio desbrozar los terrenos de monte próximos a viviendas, estableciéndose un régimen sancionador.
  - *Rendimiento:* Depende de la dificultad que existe en la parcela para efectuar el desbroce, como puede ser el ancho de calle, la densidad de la masa, la altura de poda, la existencia de especies con régimen de protección que requieren un desbroce selectivo, etc.
  - *Mecanizable:* Se entiende por mecanizable aquella parcela que reúne las condiciones para poder realizar la tarea de desbroce mediante tractor con desbrozadora de cadenas o martillos.
- *Criterios ambientales:*
  - *Erosión:* Riesgo de que se pueda producir algún tipo de erosión y su magnitud, en el caso de llevar a cabo el desbroce de la parcela, debido a la pendiente.
  - *Biodiversidad:* Riesgo de que se pierda o modifique la biodiversidad del sistema silvícola por efectuar el desbroce en la parcela evaluada.
- *Criterios sociales:*
  - *Recreo:* Existencia de zonas de paseo o tránsito de excursionistas cercanos o en la propia parcela a desbrozar.
  - *Otros usos:* Situación en una zona de pastoreo, de caza u otros usos, los cuales se pueden ver afectados por un desbroce en la parcela.
  - *Cercanía a viviendas:* Riesgo de una posible continuidad de un incendio desde la parcela hacia viviendas cercanas.
- *Criterios técnicos:*
  - *Altura del matorral:* Relacionado con la necesidad de desbroce para minimizar el riesgo de incendios en la parcela disminuyendo la continuidad vertical o la competencia entre especies.

- *Carga del matorral*: Relacionado con la posible densidad de matorral o monte bajo, y la necesidad de desbroce para minimizar la posible intensidad de un incendio forestal o la competencia entre especies.
- *Necesidad de poda*: Relacionado con la necesidad de desbroce para facilitar la accesibilidad a los pies para proceder a su poda.
- *Cercanía al turno*: Disminuir la carga de matorral para aumentar el rendimiento del aprovechamiento maderero, incluyendo corta y saca.

En el tercer nivel de la jerarquía decisional se encuentran las alternativas que han de ser evaluadas, que en este caso son las seis parcelas del mismo propietario, que se encuentran separadas entre sí. Las características de las parcelas en las que se va a jerarquizar el desbroce se describen en la Tabla 4.1.

**Tabla 4.1:** Descripción de las alternativas (parcelas) en el ejemplo de aplicación del MPC<sup>®</sup> 1.0.

	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Parcela 4	Parcela 5	Parcela 6
<b>Superficie</b>	0,517 ha	1,034 ha	0,698 ha	1,103 ha	0,711 ha	0,576 ha
<b>Pendiente media</b>	20,2 %	6,4 %	10,8 %	13,9 %	11,5 %	9,4 %
<b>Pedregosidad</b>	30 %	15 %	10 %	25 %	10 %	15 %
<b>Especie principal</b>	<i>Q. robur</i>	<i>P. pinaster</i>	<i>P. pinaster</i> y <i>Q. robur</i>	<i>P. pinaster</i>	<i>P. pinaster</i> y <i>Q. robur</i>	<i>P. pinaster</i> y <i>Q. robur</i>
<b>Edad aprox. (años)</b>	-	9 – 10	6 – 7	17 – 20	Irregular	Irregular
<b>Carga de matorral</b>	Alta	Media	Media	Alta	Alta	Alta
<b>Grado de mecanización posible</b>	Bajo	Alto	Bajo	Medio	Medio	Medio
<b>Cercanía a viviendas</b>	Si (250 m)	Si (250 m)	No	No	No	Si (200 m)
<b>Acceso por pista</b>	Si	Si	Si	Si	Si	Si

Una vez que se tiene toda la decisión jerarquizada se introduce su esquema en el software MPC<sup>®</sup>, generándose una nueva decisión en la base local del software. Es decir, al introducir los criterios y alternativas, y al fijar un objetivo y su descripción, el esquema de la decisión queda almacenado en la base de datos y puede ser recuperado posteriormente.

Una vez almacenado el esquema de la decisión, se procede a la evaluación de los pares. Con el número de criterios y alternativas establecido en este ejemplo se han de calificar 246 pares por el método AHP. Esos pares son presentados en el panel de trabajo del software de manera aleatoria (como se indicó anteriormente) y de forma individualizada para minimizar sesgos perceptivos, aunque esto es inevitable puesto que el entorno o contexto en el que se produce la decisión puede ser variable o puede haber focos de distracción (por ejemplo: teléfonos sonando).

La escala que se ha implementado en esta primera versión de MPC<sup>®</sup> es la ya mencionada escala de Saaty (1980), es decir 1 - 3 - 5 - 7 - 9 (ver descripción en el apartado 3.2.2.1). Sin embargo, se han evitado los valores intermedios, puesto que cuantas más divisiones se realicen en la escala mayor es la dificultad para establecer el peso del par. Además, la escala elegida da la suficiente información como para tener unos resultados representativos.

#### 4.2.2 Resultados

Antes de mostrar y establecer una discusión de los resultados obtenidos en este caso práctico, ha de mencionarse que éstos son fruto de una sola repetición y de las decisiones de una sola persona, pues son a título de ejemplo. En caso de querer evaluar un resultado más representativo se deberían haber efectuado más repeticiones por decisor, o incluso incorporar más decisores (decisión grupal).

Los resultados de los pesos obtenidos en la evaluación de los criterios por pares, después de evaluar todas las combinaciones posibles, se muestran en la Tabla 4.2.

**Tabla 4.2:** Resultados obtenidos en la evaluación de criterios en el ejemplo de aplicación del MPC<sup>®</sup> 1.0. (Inconsistencia matricial o  $CR = 0,15$ ).

Criterios	Peso ( $CR = 0,15$ )
Cercanía a vivienda	0,23
Carga de Matorral	0,14
Rendimiento	0,13
Mecanizable	0,11
Altura de Matorral	0,07
Superficie	0,05

Erosión	0,03
Turno	0,03
Necesidad Poda	0,03
Biodiversidad	0,02
Otros Usos	0,02
Recreo	0,01

El *CR* o *Consistency Ratio* ha resultado igual a 0,15, o lo que es lo mismo, la decisión ha sido algo inconsistente, ya que el límite que define la inconsistencia se encuentra, según Saaty (1990) en el valor de 0,10 (ver apartado 3.2.2.2). Esto puede ser debido a que se han introducido criterios como *Biodiversidad* u *Otros usos*, que muestran ambigüedad a la hora de ser calificados, y ha de recordarse la sensibilidad de la metodología a la hora de formar una matriz inconsistente con un número pequeño de pares desequilibrados. Por otra parte, ha de destacarse que casi el 60% del peso de la decisión se reparte entre únicamente cuatro criterios (*Cercanía a vivienda*, *Carga de matorral*, *Rendimiento* y *Mecanizable*). Por otra parte, existen varios criterios que no tienen apenas peso en la decisión, como el uso recreativo (*Recreo*), *Otros Usos* o *Biodiversidad*.

Los resultados (pesos e inconsistencias) de la comparación por pares de las alternativas para cada criterio, que dan lugar a las matrices de calificación por pares de las alternativas, se muestran en la Tabla 4.3.

**Tabla 4.3:** Resultados obtenidos en la evaluación de alternativas en el ejemplo de aplicación del MPC<sup>®</sup> 1.0: pesos e inconsistencias (entre paréntesis).

Criterios	Alternativas					
	Parcela 1	Parcela 2	Parcela 3	Parcela 4	Parcela 5	Parcela 6
<b>Mecanización</b>	0,03 (0,08)	0,41 (0,08)	0,05 (0,08)	0,12 (0,08)	0,18 (0,08)	0,16 (0,08)
<b>Superficie</b>	0,06 (0,03)	0,35 (0,03)	0,08 (0,03)	0,29 (0,03)	0,13 (0,03)	0,07 (0,03)
<b>Rendimiento</b>	0,04 (0,09)	0,40 (0,09)	0,05 (0,09)	0,13 (0,09)	0,22 (0,09)	0,10 (0,09)
<b>Erosión</b>	0,04 (0,06)	0,31 (0,06)	0,21 (0,06)	0,09 (0,06)	0,11 (0,06)	0,19 (0,06)
<b>Biodiversidad</b>	0,06 (0,45)	0,15 (0,45)	0,11 (0,45)	0,13 (0,45)	0,15 (0,45)	0,09 (0,45)
<b>Recreo</b>	0,05 (0,04)	0,44 (0,04)	0,11 (0,04)	0,13 (0,04)	0,13 (0,04)	0,12 (0,04)
<b>Otros usos</b>	0,07 (0,03)	0,36 (0,03)	0,14 (0,03)	0,12 (0,03)	0,14 (0,03)	0,14 (0,03)
<b>Cercanía a vivienda</b>	0,25 (0,08)	0,36 (0,08)	0,05 (0,08)	0,05 (0,08)	0,05 (0,08)	0,17 (0,08)
<b>Altura matorral</b>	0,32 (0,06)	0,06 (0,06)	0,08 (0,06)	0,16 (0,06)	0,07 (0,06)	0,27 (0,06)
<b>Carga matorral</b>	0,30 (0,08)	0,04 (0,08)	0,08 (0,08)	0,19 (0,08)	0,08 (0,08)	0,23 (0,08)
<b>Necesidad poda</b>	0,31 (0,07)	0,06 (0,07)	0,06 (0,07)	0,17 (0,07)	0,09 (0,07)	0,27 (0,07)
<b>Turno</b>	0,22 (0,11)	0,10 (0,11)	0,04 (0,11)	0,41 (0,11)	0,11 (0,11)	0,06 (0,11)

Puede observarse que las matrices con respecto a los criterios *Turno* y *Biodiversidad* se muestran inconsistentes (valor  $> 0,10$ ), lo que puede ser debido a que son difícilmente cuantificables con la información obtenida o manejada, especialmente el segundo criterio. Por otra parte, el resto de matrices son consistentes. Se puede denotar con ello que la decisión ha sido llevada a cabo con la mayor concentración posible, y que la información manejada era suficiente para valorar las alternativas con respecto a los criterios establecidos.

Por último, el resultado final que muestra la jerarquía de las parcelas según su prioridad de desbroce, con su peso correspondiente, es la que se muestra en la Tabla 4.4.

**Tabla 4.4:** Resultado final del ejemplo de aplicación del MPC<sup>©</sup> 1.0: peso de cada parcela para su prioridad de desbroce.

Prioridad de desbroce	Peso
1º: Parcela 2	0,43
2º: Parcela 5	0,19
3º: Parcela 6	0,17
4º: Parcela 4	0,13
5º: Parcela 3	0,05
6º: Parcela 1	0,03

Esta jerarquía muestra el resultado del cálculo matricial realizado por MPC<sup>©</sup> 1.0. Se destaca que la parcela más prioritaria para desbrozar (la n° 2) ha obtenido un peso del 43% de la calificación, muy por encima del resto (las siguientes en prioridad no alcanzan el 20%). El resultado parece lógico si se tiene en cuenta que la parcela 2 destaca por su cercanía a viviendas, que ha sido uno de los criterios con más peso en la decisión, además de tener el mayor rendimiento de desbroce estimado con respecto a las demás, criterio que también ha resultado con bastante peso en la decisión.

### 4.2.3 *Discusión*

Después del desarrollo del MPC<sup>©</sup> 1.0 y de aplicarlo a un caso práctico de asesoramiento forestal, es necesario discutir los puntos que a continuación se mencionan:

- La división de criterios en subcriterios se hace necesaria, ya que la evaluación de todos los criterios en un mismo nivel hace que el número de pares a comparar sea muy elevado debido a la combinatoria. Cuando se divide un criterio en subcriterios, estos últimos son evaluados de manera independiente, por lo que la combinatoria disminuye en número de comparaciones.
- Debido a la incorporación de criterios subjetivos, que han de ser tenidos en cuenta, es necesario que un decisor repita su evaluación, ya que su opinión sobre un criterio puede variar. Con ello se hace necesaria la incorporación de una base de datos al software, ya que es necesario almacenar los resultados de diferentes repeticiones así como de diferentes decisores. De esta manera se pueden almacenar las diferentes decisiones para compararlas con posterioridad.
- En esta primera versión desarrollada, para llegar al nivel de síntesis y resultados es obligatorio evaluar los criterios y seguidamente evaluar las alternativas. Esto conlleva que en decisiones con muchos criterios y muchas alternativas el decisor se vea inmerso en un proceso de calificación por pares muy costoso con lo que respecta al tiempo que debe invertir. Por ello, parece razonable incluir en el software la posibilidad de independizar la evaluación de criterios y la evaluación de alternativas, desde el punto de vista de la pérdida de la obligatoriedad de tener que hacer una después de la otra.

Teniendo en cuenta todas las consideraciones anteriores, se ha decidido desarrollar una segunda versión del programa MPC<sup>©</sup> con el fin de implementar todas las posibles mejoras que han surgido de aplicar la versión 1.0.

### 4.3 MPC<sup>©</sup> 2.0

El programa MPC<sup>©</sup> 2.0 (Pérez-Rodríguez & Rojo-Alboreca 2011, 2012a) se ha diseñado para facilitar la resolución de decisiones con esquemas de criterios bifurcados, pues incluye la posibilidad de división de los criterios en subcriterios organizados en dos niveles. La división en niveles facilita al usuario la fragmentación de un criterio, evitando así su generalización.

Además, para minimizar los sesgos cognoscitivos en la comparación por pares se han tenido en cuenta en la versión 2.0 diversos estudios, como los de Biederman & Cooper (1992), Chun & Cavanagh (1997), Treisman & Kanwisher (1998), Henderson & Hollingworth (2003) y Hollingworth (2007), con la intención de evitar o minimizar la distracción del usuario, focalizándolo en la evaluación del par cuya evaluación está en curso.

El proceso de automatización en MPC<sup>©</sup> 2.0 varía si se están calificando criterios u alternativas. En el primer caso, se exponen inicialmente los criterios del primer nivel, y posteriormente y terminadas las calificaciones del primero, se exponen los criterios de los distintos subniveles de manera independiente. Con ello se obtiene una matriz de comparaciones para el primer nivel, y tantas matrices de comparaciones como subniveles haya. La aplicación del cálculo matricial da como resultado el peso medio obtenido para cada criterio, estando definido dentro del intervalo [0,1].

En el caso de la valoración de las alternativas, el proceso de automatización difiere del de la calificación de criterios, puesto que solamente se realiza en los extremos del esquema (subcriterios del último nivel). Por tanto, si un criterio se divide en subcriterios, se efectúa la comparación de pares de cada alternativa bajo cada uno de dichos subcriterios. En el caso de que un criterio no se divida en subcriterios, la evolución de alternativas se realiza bajo los criterios raíz.

En esta versión 2.0 también se ha añadido el módulo de aleatoriedad, que permite exponer pares de manera que la aparición de los criterios o las alternativas a izquierda o derecha de la ventana de comparación sea aleatoria, además de la posibilidad de imponer un tiempo mínimo entre par y par. Se pretende con ello evitar que en diversas repeticiones pueda intervenir la memoria visual, lo cual causaría sesgos en la emisión de los juicios, perdiendo objetividad la repetición y desembocando en un resultado poco útil.

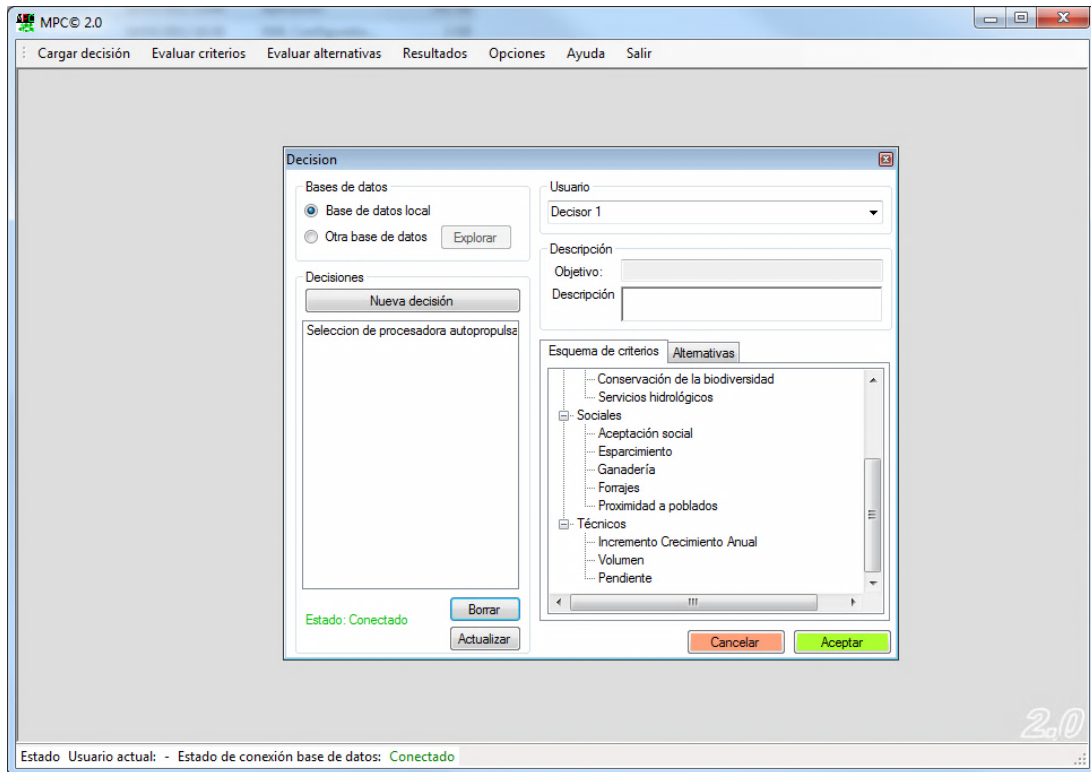
Para la utilización del software 2.0, el usuario simplemente ha de seleccionar una decisión ya creada, o bien introducir una nueva en la base local del propio software o en otra independiente que se puede crear desde el programa. Una vez cargada o creada la decisión, el usuario puede proceder a efectuar las comparaciones de los criterios o de las alternativas bajo cada criterio, pudiendo hacer estas dos etapas de manera independiente como ya se ha comentado. Realizadas las valoraciones, se puede acceder a la ventana donde se visualizan las

gráficas de los pesos obtenidos. A su vez, el usuario tiene la capacidad de añadir las repeticiones que estime oportunas, así como de seleccionar los usuarios que quiera tener en cuenta. Los resultados generales se obtienen al hacer interaccionar todas las valoraciones de los criterios con todas las valoraciones de las alternativas, o en su caso aquellas repeticiones que el usuario seleccione. También es posible obtener pesos medios entre ellos.

Una vez obtenidos los resultados generales, el usuario tiene la posibilidad de realizar un análisis de sensibilidad de los mismos. Para ello se han utilizado las propuestas de trabajos como los de Triantaphyllou & Sánchez (1997) y de Wijnmalen & Wedley (2009). El usuario tiene, entonces, la capacidad de modificar los pesos obtenidos de los criterios, pudiendo observar en tiempo real la variación que se produce en la gráfica de resultados generales.

Resumiendo, el programa MPC<sup>®</sup> 2.0 tiene las siguientes características generales:

- a) Metodología AHP automatizada en esquemas de criterios de hasta dos niveles, y exposición de cada par de comparación de manera independiente, lo que facilita la automatización de las comparaciones y la focalización de la concentración en el par expuesto.
- b) Base de datos propia o capacidad de creación de base de datos independientes, lo que supone retroalimentación de las calificaciones bajo un factor temporal.
- c) Valoración independiente de los criterios y de las alternativas.
- d) Posibilidad de participación de hasta 40 usuarios: facilita la comparación de los resultados de varios usuarios en una misma decisión.
- e) Posibilidad de realización de hasta 100 repeticiones por usuario.
- f) Interfaz de usuario sencilla (Figura 4.2): se persigue un fácil aprendizaje de utilización y autonomía, para que el decisor ocupe su tiempo y concentración en el par de comparación, sin que existan otros elementos que le distraigan.



**Figura 4.2:** Ventana principal del programa MPC<sup>®</sup> 2.0.

#### 4.3.1 Aplicación del programa MPC<sup>®</sup> 2.0: Selección de maquinaria forestal

Como ejemplo de aplicación se ha supuesto el caso de una empresa de gestión forestal de pequeño-mediano tamaño que pretende adquirir una máquina autopropulsada para procesado de la madera (Pérez-Rodríguez & Rojo-Alboreca 2012a). Dichas máquinas son, por lo general, bastante costosas, por lo que esta decisión ha de plantearse como de alta dificultad por su trascendencia económica inicial y costes posteriores.

El objetivo que se persigue con esta decisión es evaluar todas las posibles alternativas bajo ciertos criterios para que la elección de esa máquina sea idónea considerando los aspectos relevantes, sin basarse solamente en el costo inicial de la misma; esto es, se pretenden valorar también los gastos, la manejabilidad, la contaminación, la seguridad, etc.

Por tanto, el esquema de criterios que se ha tenido en cuenta a la hora de elegir una máquina u otra en este caso práctico ha sido el siguiente, dividido en dos niveles (con criterios principales o raíz, y otros subcriterios asociados a los mismos):

- *Criterios económicos*: engloban aquellos que afectan al costo de la máquina, mantenimiento posterior, etc. Se dividen en:
  - *Precio*: Coste de adquisición.
  - *Mantenimiento*: Coste de reparaciones y reposición de accesorios, ruedas, etc.
  - *Consumo*: Coste de combustible y aceite.
- *Criterios sociales*: basados en la repercusión que el uso de esa máquina puede conllevar a nivel del personal que la utiliza o del que directamente se ve afectado por ella:
  - *Contaminación*: engloba la emisión de CO<sub>2</sub>, así como otros tipos de contaminación como la acústica o la posibilidad de pérdidas de aceite, etc.
  - *Seguridad*: incluye la seguridad que ofrece la máquina en cuanto a la caída de objetos, vuelcos, o su estabilidad en pendientes o terrenos inestables.
- *Criterios ambientales*: consideran la posible degradación que conlleva el uso de cada una de las máquinas en el ecosistema. Se dividen en:
  - *Erosión mineral*: grado de compactación o remoción del suelo, entre otros.
  - *Afección del estrato vegetal*: grado de degradación que puede sufrir la vegetación del sotobosque ajena al aprovechamiento.
- *Criterios técnicos*: incluyen aspectos como el rendimiento esperado y la agilidad de la máquina. Se dividen en:
  - *Rendimiento*: eficiencia esperada del binomio procesado/tiempo.
  - *Manejabilidad*: agilidad de movimiento dentro de la parcela.
  - *Tamaño*: posibilidad de utilización de la máquina en tipos de cortas donde no se extraen todos los pies.
  - *Movilidad*: facilidad o dificultad de desplazamiento en grandes distancias.

Por otra parte, las alternativas propuestas para un caso como el expuesto deberán ser aquellas que, por su viabilidad de compra, estén disponibles en la zona de uso. Las cuatro máquinas consideradas para este ejemplo, cuyas principales características pueden consultarse en las fichas descriptivas incluidas en el apartado de Anexos de esta tesis, han sido:

- Sampo Rosenlew 1066.
- Valmet 911.1.

- Retroexcavadora JCB210 + cabezal procesador Kesla 20RHS.
- Tractor agrícola adaptado Valtra 130 + cabezal procesador.

Conocidos los criterios y alternativas, se ha procedido a introducir el esquema de la decisión en el programa MPC<sup>®</sup> 2.0. Posteriormente, un experto ha realizado la comparación por pares de los criterios y de las alternativas bajo cada criterio. Para aumentar la precisión de los resultados, se han repetido cuatro veces las calificaciones de los criterios y tres veces las calificaciones de las alternativas.

#### 4.3.2 Resultados

Los resultados obtenidos de los pesos de los criterios, así como las inconsistencias obtenidas en su comparación por pares, se pueden ver en la Tabla 4.5, que corresponden a los determinados por un único experto con amplio conocimiento en maquinaria forestal en cuatro repeticiones.

**Tabla 4.5:** Resultados de la comparación de los criterios en el ejemplo de aplicación del MPC<sup>®</sup> 2.0: pesos e inconsistencias (en paréntesis). Des. Est.: Desviación estándar de los pesos.

Criterios	Repeticiones				Des. Est.
	1	2	3	4	
<b>Económicos</b>	0,27 (0,092)	0,26 (0,106)	0,30 (0,108)	0,24 (0,069)	0,029
- Precio	0,14 (0,014)	0,15 (0,056)	0,10 (0,105)	0,10 (0,105)	0,021
- Costes de mantenimiento	0,24 (0,014)	0,27 (0,056)	0,21 (0,105)	0,21 (0,105)	0,026
- Consumo	0,62 (0,014)	0,61 (0,056)	0,68 (0,105)	0,69 (0,105)	0,031
<b>Sociales</b>	0,05 (0,092)	0,05 (0,106)	0,12 (0,108)	0,14 (0,069)	0,035
- Contaminación	0,14 (0)	0,17 (0)	0,25 (0)	0,25 (0)	0,056
- Seguridad	0,86 (0)	0,83 (0)	0,75 (0)	0,75 (0)	0,056
<b>Ambientales</b>	0,11 (0,092)	0,09 (0,106)	0,07 (0,108)	0,08 (0,069)	0,017
- Erosión Mineral	0,75 (0)	0,75 (0)	0,75 (0)	0,75 (0)	0,040
- Afección estrato vegetal	0,25 (0)	0,25 (0)	0,25 (0)	0,25 (0)	0,040
<b>Técnicos</b>	0,56 (0,092)	0,59 (0,106)	0,51 (0,108)	0,54 (0,069)	0,074
- Rendimiento	0,40 (0,156)	0,26 (0,271)	0,46 (0,106)	0,46 (0,106)	0,098
- Manejabilidad	0,19 (0,156)	0,36 (0,271)	0,17 (0,106)	0,17 (0,106)	0,092
- Tamaño	0,11 (0,156)	0,09 (0,271)	0,10 (0,106)	0,10 (0,106)	0,008
- Movilidad	0,30 (0,156)	0,30 (0,271)	0,27 (0,106)	0,27 (0,106)	0,086

Como se puede observar, para el decisor participante el criterio principal o raíz más destacado ha sido el *Técnico*, pero se han encontrado inconsistencias (valores > 0,10) en los subcriterios en los que se divide. No obstante, los resultados obtenidos en este caso no desvelan una

dispersión muy alta, por lo que se puede asumir que aun siendo inconsistente, el conjunto de resultados obtenidos es homogéneo. Con respecto a los demás criterios, todos se muestran consistentes o, en algunos casos, están muy próximos a serlo.

Con respecto a las alternativas, sus pesos y valores de inconsistencia obtenidos en las tres repeticiones de sus comparaciones con respecto a cada criterio se muestran en la Tabla 4.6.

**Tabla 4.6:** Resultados obtenidos en el proceso de evaluación de alternativas bajo cada criterio en el ejemplo de aplicación del MPC<sup>®</sup> 2.0: pesos e inconsistencias (en paréntesis).

Criterios	Sampo Rosenlew 1066			Valmet 911.1			Retroexcavadora JCB210 + cabezal			Valtra 130 adaptado + cabezal		
	Repeticiones			Repeticiones			Repeticiones			Repeticiones		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
<b>Económicos</b>												
Precio	0,519 (0,015)	0,555 (0,015)	0,473 (0,052)	0,201 (0,015)	0,079 (0,015)	0,122 (0,052)	0,079 (0,015)	0,097 (0,015)	0,122 (0,052)	0,201 (0,015)	0,252 (0,015)	0,283 (0,052)
Mantenimiento	0,463 (0,106)	0,375 (0)	0,473 (0,052)	0,096 (0,106)	0,125 (0)	0,122 (0,052)	0,169 (0,106)	0,125 (0)	0,122 (0,052)	0,273 (0,106)	0,375 (0)	0,283 (0,052)
Consumo	0,439 (0,020)	0,543 (0,069)	0,365 (0,053)	0,124 (0,020)	0,076 (0,069)	0,099 (0,053)	0,124 (0,020)	0,136 (0,069)	0,172 (0,053)	0,313 (0,002)	0,245 (0,069)	0,365 (0,053)
<b>Sociales</b>												
Contaminación	0,473 (0,052)	0,365 (0,053)	0,375 (0)	0,122 (0,052)	0,099 (0,053)	0,125 (0)	0,122 (0,052)	0,172 (0,053)	0,125 (0)	0,283 (0,052)	0,365 (0,053)	0,375 (0)
Seguridad	0,081 (0,039)	0,067 (0,040)	0,097 (0,052)	0,418 (0,039)	0,426 (0,040)	0,384 (0,052)	0,283 (0,039)	0,372 (0,040)	0,291 (0,052)	0,217 (0,039)	0,134 (0,040)	0,228 (0,052)
<b>Ambientales</b>												
Erosión mineral	0,312 (0)	0,300 (0)	0,365 (0,053)	0,062 (0)	0,100 (0)	0,099 (0,053)	0,312 (0)	0,300 (0)	0,172 (0,053)	0,312 (0)	0,300 (0)	0,365 (0,053)
Afección estrato vegetal	0,300 (0)	0,300 (0)	0,300 (0)	0,100 (0)	0,100 (0)	0,100 (0)	0,300 (0)	0,300 (0)	0,300 (0)	0,300 (0)	0,300 (0)	0,300 (0)
<b>Técnicos</b>												
Rendimiento	0,097 (0,052)	0,099 (0,053)	0,099 (0,053)	0,291 (0,052)	0,365 (0,053)	0,365 (0,053)	0,384 (0,052)	0,365 (0,053)	0,365 (0,053)	0,228 (0,052)	0,172 (0,053)	0,172 (0,053)
Manejabilidad	0,375 (0)	0,375 (0)	0,397 (0)	0,125 (0)	0,125 (0)	0,103 (0)	0,125 (0)	0,125 (0)	0,103 (0)	0,375 (0)	0,375 (0)	0,397 (0)
Tamaño	0,375 (0)	0,375 (0)	0,375 (0)	0,125 (0)	0,125 (0)	0,125 (0)	0,125 (0)	0,125 (0)	0,125 (0)	0,375 (0)	0,375 (0)	0,375 (0)
Movilidad	0,300 (0)	0,389 (0,015)	0,357 (0,039)	0,100 (0)	0,069 (0,015)	0,083 (0,039)	0,300 (0)	0,153 (0,015)	0,161 (0,039)	0,300 (0)	0,389 (0,015)	0,399 (0,039)

Puede observarse, por ejemplo, que en el criterio *Precio* el decisor se ha decantado, en términos medios, por la primera alternativa *Sampo Rosenlew 1066*, seguido del *Tractor Valtra 130 + cabezal*.

El resultado de completar el cálculo matricial (multiplicar el peso de las alternativas por el de los criterios), es la matriz de los pesos globales de cada una de las alternativas, cuyos valores se muestran en la Tabla 4.7. En ella pueden observarse los resultados de las diferentes

posibles combinaciones de los pesos de los criterios y de las alternativas obtenidos en las distintas repeticiones, como utilidad del programa MPC<sup>©</sup> 2.0, así como el valor promedio y su desviación estándar, que en este ejemplo indican la preferencia por la alternativa 4 (*Tractor Valtra 130 + cabezal*), seguida de la alternativa 1 (*Sampo Rosenlew 1066*).

**Tabla 4.7:** Resultados finales fruto de las combinaciones de los pesos de los criterios y de las alternativas entre decisores en el ejemplo de aplicación del MPC<sup>©</sup> 2.0.

Repetición Criterios	Repetición Alternativas	Sampo Rosenlew 1066	Valmet 911.1	Retroexcavadora JCB210 + cabezal	Tractor Valtra 130 + cabezal
Decisor 1	Decisor 1	0,27	0,23	0,17	<b>0,31</b>
Decisor 1	Decisor 2	0,28	0,21	0,17	<b>0,33</b>
Decisor 1	Decisor 3	0,30	0,20	0,17	<b>0,32</b>
Decisor 2	Decisor 1	0,30	0,18	0,16	<b>0,33</b>
Decisor 2	Decisor 2	0,27	0,21	0,16	<b>0,31</b>
Decisor 2	Decisor 3	0,32	0,23	0,16	<b>0,35</b>
Decisor 3	Decisor 1	0,29	0,19	0,20	<b>0,34</b>
Decisor 3	Decisor 2	0,26	0,21	0,19	<b>0,32</b>
Decisor 3	Decisor 3	0,29	0,24	0,19	<b>0,29</b>
Decisor 4	Decisor 1	0,27	0,22	0,20	<b>0,31</b>
Decisor 4	Decisor 2	0,27	0,23	0,20	<b>0,30</b>
Decisor 4	Decisor 3	0,29	0,21	0,20	<b>0,30</b>
<b>Promedio</b>		<b>29 %</b>	<b>21 %</b>	<b>18 %</b>	<b>32 %</b>
<b>Desviación estándar:</b>		<b>2,02 %</b>	<b>1,83 %</b>	<b>1,64 %</b>	<b>1,96 %</b>

Además de seleccionar la mejor alternativa posible, los resultados del cálculo matricial final ayudan a jerarquizar también los criterios por su grado de importancia relativa en la decisión, tal como se muestra en la Tabla 4.8. En ella se observa que los criterios más importantes han resultado los *Técnicos*, seguidos de los *Económicos*.

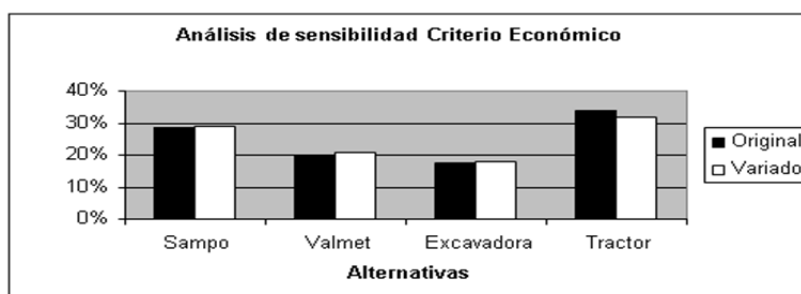
**Tabla 4.8:** Ranking porcentual de los pesos de los criterios evaluados en el ejemplo de aplicación del MPC<sup>©</sup> 2.0.

Criterio	
Técnicos	55,00%
Económicos	26,75%
Sociales	9,50%
Ambientales	8,75%
Subcriterios	
Rendimiento	21,73 %
Consumo	17,39 %
Movilidad	15,68 %
Manejabilidad	12,24 %

Seguridad	7,18 %
Erosión Mineral	6,56 %
Costes de mantenimiento	6,22 %
Tamaño	5,50 %
Precio	3,28 %
Afección estrato vegetal	2,19 %
Contaminación	1,82 %

Esta jerarquización de los criterios sirve de base para un análisis de sensibilidad, ya que el decisor puede estar o no de acuerdo con el resultado obtenido, o estar interesado en conocer cómo cambia al modificarse el peso de los criterios. Por ello, en el software MPC<sup>©</sup> 2.0 el decisor puede variar el peso de cada uno de los criterios, ajustándolos a un valor más adecuado bajo su punto de vista, viendo gráficamente y en tiempo real cómo varían los resultados bajo ese cambio. Este análisis de sensibilidad permite comprobar si el resultado obtenido es rígido (si hay poca variación en los resultados) o si por el contrario muestra flexibilidad (si cambia notoriamente la jerarquía de los resultados al modificarse el peso de los criterios), lo cual ayuda al decisor a poder justificar la decisión que ha de tomar, o a destacar aquellos criterios que pueden ser críticos en su decisión.

Un ejemplo del análisis de sensibilidad que permite realizar MPC<sup>©</sup> 2.0, para el caso analizado, se muestra en la Figura 4.3, donde se comparan los resultados obtenidos originalmente para cada alternativa con los resultantes al aumentar un 10% el peso del criterio raíz *Económico*. Como se observa, en ese caso las diferencias iniciales entre las alternativas 4 y 1 se reducirían, complicando la decisión de selección entre una u otra.



**Figura 4.3.** Ejemplo de análisis de sensibilidad. Resultado del aumento de un 10% del peso del criterio raíz *Económico* en el ejemplo de aplicación del MPC<sup>©</sup> 2.0.

### 4.3.3 *Discusión*

En la versión 2.0 de MPC<sup>®</sup> se han introducido mejoras que han surgido de la experiencia en la aplicación práctica de la versión inicial 1.0. Por ejemplo, el esquema de criterios propuesto en esta aplicación supone un número de pares por combinatoria de 17, en contraposición a los 50 pares que habría que evaluar en el caso que se dispusieran todos los subcriterios en un mismo nivel.

Por otra parte, la incorporación de la base de datos y la posibilidad de aumentar participantes en la decisión mejoran notablemente la capacidad de síntesis final del proceso.

## 4.4 MPC<sup>®</sup> 2.01 MEX

El programa MPC<sup>®</sup> 2.01 MEX es una versión específica del software desarrollado para la aplicación de la metodología AHP a la gestión forestal sostenible en el Estado de Durango (México). Para ello se ha establecido por defecto una lista fija de criterios para un objetivo concreto que, en este caso, es la “*selección del método de manejo en subrodales de México*”. El usuario puede elegir libremente aquellos criterios del listado que le interese utilizar en cada caso en función del subrodal o predio que esté manejando (no necesariamente tiene que utilizar todos). Dichos criterios de valoración se han organizado en dos niveles, para facilitar una evaluación más detallada de las alternativas de manejo, y han sido los siguientes:

- *Criterios económicos*: que se subdividen en:
  - *Valor de la cosecha forestal*: ingresos por la venta de madera.
  - *Otros ingresos*: obtenidos por actividades como ecoturismo, aprovechamiento de fauna silvestre, captura de carbono, etc.
  - *Costos del abastecimiento (aprovechamiento) forestal*.
  - *Costos de establecimiento de una nueva masa forestal*, ya sea procedente de repoblación o de regeneración natural.
- *Provisión de servicios ambientales*: subdivididos en:
  - *Servicios hidrológicos*.

- *Capacidad de captura de carbono.*
- *Conservación de la biodiversidad.*
- *Disminución de los riesgos de erosión.*
- *Beneficios sociales:* divididos en:
  - *Aceptación social.*
  - *Servicios de esparcimiento.*
  - *Producción de forrajes.*
  - *Aprovechamiento de ganadería.*
  - *Proximidad a los poblados.*
- *Aspectos Técnicos:* que se dividen en:
  - *Pronósticos de crecimiento para el siguiente ciclo de corta:* mediante el valor del ICA o Incremento Corriente Anual ( $m^3 ha^{-1} año^{-1}$ ).
  - *Índice de sitio (m).*
  - *Existencias volumétricas ( $m^3/ha$ ).*
  - *Pendiente.*
  - *Densidad:* mediante el valor del Índice de Densidad de Rodales de Reineke (IDRR) (Reineke 1933), y del índice de Fracción de Cobertura (FCC).

Las alternativas que contempla el programa MPC<sup>©</sup> 2.01 MEX son cada uno de los siguientes métodos de manejo o gestión: MMOBI (*Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares*), MDS (*Método de Desarrollo Silvícola*), Corta a Matarrasa (o corta a hecho) y No cortar (en todas sus modalidades: captura de carbono, biomasa...).

El MMOBI es el método de manejo forestal irregular aplicado en México desde 1984, como evolución o mejora de otros existentes anteriormente. A grandes rasgos consiste en la aplicación de cortas de selección individual (o entresaca pie a pie), buscando una estructura de masa o distribución diamétrica de tipo J invertida (o exponencial negativa), y en el que la posibilidad o volumen de corta se estima de acuerdo al crecimiento temporal de la masa forestal, distribuyendo la corta en todas las clases diamétricas (Rodríguez *et al.* 1960). El MMOBI se aplica en arbolado que ha alcanzado la madurez, o bien en arbolado con daños físicos, afectado por plagas o con alguna característica indeseable. La ordenación considera

tantas áreas de aprovechamiento como años tenga el ciclo de corta (Prieto & Hernández 2007).

El MDS es, por el contrario, el método mexicano de manejo regular de bosques, desarrollado a partir de 1974 como una alternativa a los métodos de manejo irregulares. El MDS tiene como objetivo alcanzar el concepto de bosque regular normal para captar el máximo potencial productivo del sitio y lograr un rendimiento sostenido en volumen. Este método, también conocido como *Sistema de Rotación Forestal*, consiste en un ciclo de producción (rotación) que es dividido en un período de crecimiento (cortas intermedias) y uno de regeneración. En el primero se aplican un pre-aclareo y tres aclareos por lo bajo, y en el segundo una corta de regeneración bajo el método de árboles padres o semilleros. En la segunda y posteriores rotaciones se aplican simultáneamente la corta de liberación y el pre-aclareo (Musálem 1979; Rosales *et al.* 1982). Prieto & Hernández (2007) indican ciclos de corta de 10, 12, 16 y 18 años, siendo el de 10 años el de mayor aplicación. Por otra parte, los turnos en el MDS oscilan entre 60 y 90 años, siendo el más común el de 60 años.

Por limitaciones ambientales y legislativas del gobierno mexicano, no en todos los casos se pueden considerar las cuatro alternativas anteriores, por lo que en el programa MPC<sup>®</sup> 2.01 MEX se ha establecido un mecanismo de preselección de alternativas. Para ello se ha utilizado un sistema de árbol decisional (Tabla 4.9), en el que en función de los valores de diferentes variables se limita la oferta de alternativas a cada caso en concreto.

**Tabla 4.9:** Árbol de decisiones para la selección del método de manejo en bosques naturales del estado de Durango (México). ER: existencias reales; m<sup>3</sup>rta/ha: volumen en rollo total del árbol por hectárea.

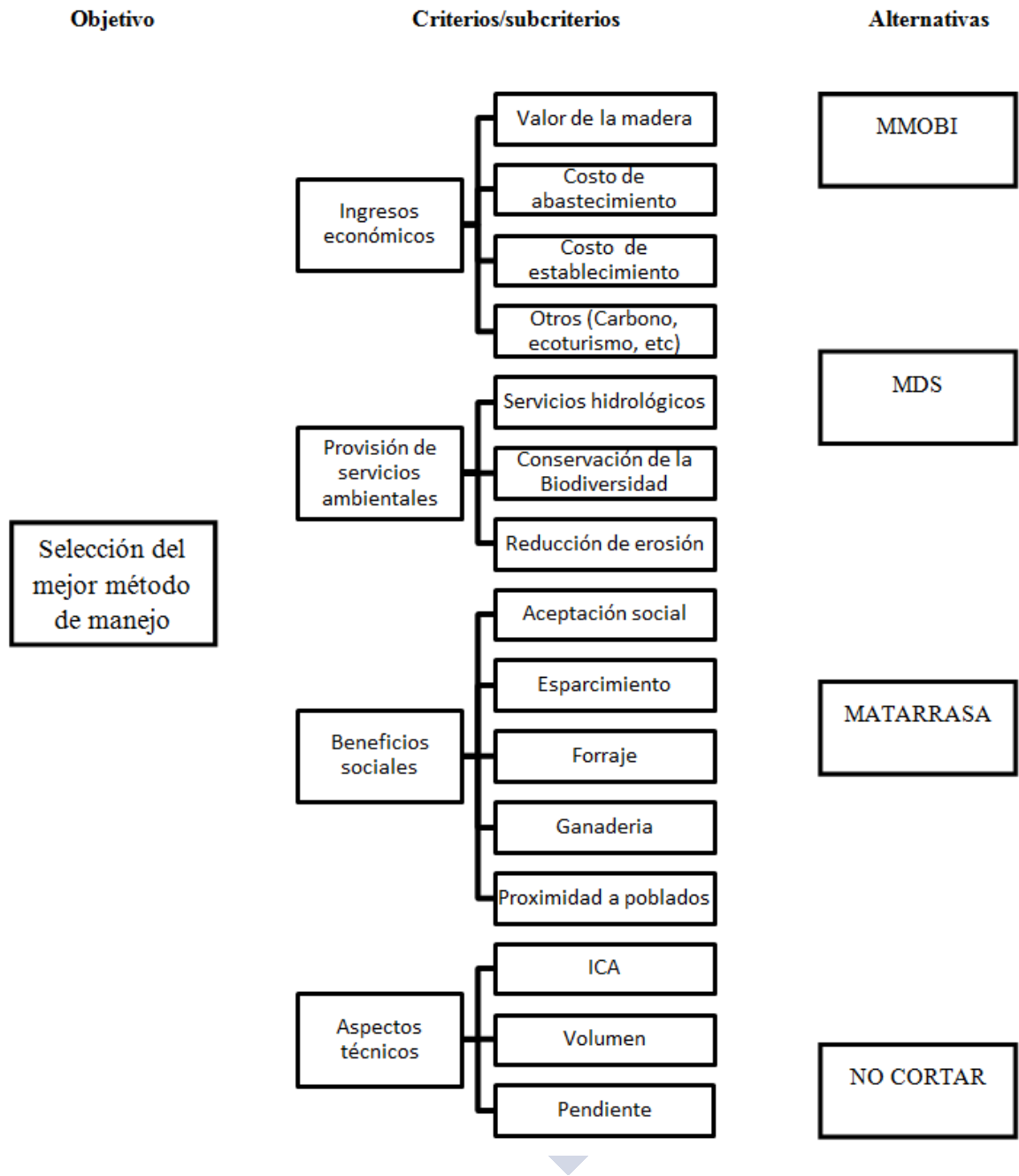
ER de pino < 40 m <sup>3</sup> rta/ha y ER encino >40 m <sup>3</sup> rta/ha?
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si: Selección (SELC); Posibles métodos: MMOBI, No Cortar</li> <li>• No: Siguiende</li> </ul>
Pendiente > 50%?
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si: Selección (SELP); Posibles métodos: MMOBI, No Cortar</li> <li>• No: Siguiende</li> </ul>
Nivel de deterioro > 15?
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si: Selección (SELDE); Posibles métodos: MMOBI, No Cortar</li> <li>• No: Siguiende</li> </ul>
Índice de densidad (pino) < 315.9 ó Índice de sitio < 10.5m?
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si: Selección (SELPS); Posibles métodos: MMOBI, No Cortar, Corta a Matarrasa*</li> <li>• No: Siguiende</li> </ul>

Composición de encino > 30%? <ul style="list-style-type: none"> <li>• Si: Selección (SELC); Posibles métodos: MMOBI, No Cortar, Corta a Matarrasa*</li> <li>• No: Siguiete</li> </ul>
Edad media > 100 años? <ul style="list-style-type: none"> <li>• Si: Selección (SELM); Posibles métodos: MMOBI, No Cortar, Corta a Matarrasa*</li> <li>• No: Siguiete</li> </ul>
Candidato a prescripción por regulación a CR? <ul style="list-style-type: none"> <li>• Si: Árboles padres (CR); Posibles métodos: MMOBI, MDS, No Cortar.</li> <li>• No: Siguiete</li> </ul>
Condición de liberación: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Si: Árboles padre (CL); Posibles métodos: MDS, No cortar y Matarrasa.</li> <li>• No: Aclareos (ACL); Posibles métodos: MDS, No Cortar.</li> </ul>
* Superficies no mayores de 10 ha y pendiente no mayor del 15% para Matarrasa

Independientemente de las condiciones particulares del problema concreto que se pretende resolver (selección de la mejor alternativa de manejo o gestión en México), el programa MPC<sup>©</sup> 2.01 MEX posee las mismas utilidades que la versión 2.0 (ver apartado 4.3).

#### **4.4.1 Aplicación del programa MPC<sup>©</sup> 2.01 MEX: Priorización del método de manejo en bosques de México**

Para un ejemplo de aplicación del software MPC<sup>©</sup> 2.01 MEX se propuso a cinco decisores (expertos) su utilización para seleccionar el mejor método de manejo forestal para un rodal concreto de los bosques del estado de Durango, México. Para ello se decidió establecer inicialmente, por consenso, la elección de los criterios que se tendrían en cuenta en la decisión, esquema que sería único e igual para todos ellos en las repeticiones, con el fin de poder compararlas. Dicho esquema o estructura jerárquica de los criterios de valoración (eliminando del listado original tres criterios: *Capacidad de captura de carbono*, *Índice de sitio* y *Densidad*), junto con las alternativas de manejo, se presenta en la Figura 4.4.



**Figura 4.4:** Estructura jerárquica de los criterios de valoración y de las alternativas de manejo en el ejemplo de aplicación del software MPC<sup>®</sup> 2.01 MEX.

Elegido el esquema se realizó la comparación por pares de los criterios y subcriterios, para lo cual cada usuario efectuó tres repeticiones de la misma decisión, obteniéndose los pesos e inconsistencias de los criterios y subcriterios para cada una de ellas. Finalmente se realizó un análisis de sensibilidad para ver la rigidez de la decisión tomada.

### 4.4.2 Resultados

En la Tabla 4.10 se muestran los resultados de la repetición más consistente de cada decisor. La elección de las repeticiones consistentes (descartando las inconsistentes) es fundamental, ya que en el caso contrario se estarían incorporando en los resultados finales datos que no tienen la suficiente fiabilidad, como por ejemplo, decisiones que hubieran sido tomadas al azar (o por error). Puede observarse que, con gran diferencia, los criterios *Técnicos* fueron los que obtuvieron una mayor importancia o peso (0,560), especialmente la *Pendiente* (0,638), mientras que los menos importantes a juicio de los decisores fueron los *Ambientales* (0,078).

**Tabla 4.10:** Peso e inconsistencia (en paréntesis) de los criterios después de la evaluación de los cinco decisores en el ejemplo de aplicación del software MPC<sup>®</sup> 2.01 MEX.

Criterios	Decisor 1	Decisor 2	Decisor 3	Decisor 4	Decisor 5	Peso medio
<b>Económicos:</b>	0,28 (0,080)	0,28 (0,080)	0,25 (0,048)	0,25 (0,048)	0,25 (0,121)	<b>0,262</b>
Costos de establecimiento	0,50 (0,068)	0,46 (0,106)	0,46 (0,106)	0,46 (0,118)	0,46 (0,106)	<b>0,468</b>
Costos de abastecimiento	0,26 (0,068)	0,27 (0,106)	0,27 (0,106)	0,16 (0,118)	0,27 (0,106)	<b>0,246</b>
Ingresos de madera	0,16 (0,068)	0,17 (0,106)	0,17 (0,106)	0,30 (0,118)	0,17 (0,106)	<b>0,194</b>
Otros ingresos	0,08 (0,068)	0,10 (0,106)	0,10 (0,106)	0,08 (0,118)	0,10 (0,106)	<b>0,092</b>
<b>Ambientales:</b>	0,06 (0,080)	0,06 (0,080)	0,06 (0,048)	0,06 (0,048)	0,15 (0,121)	<b>0,078</b>
Riesgo de erosión	0,63 (0,029)	0,63 (0,029)	0,61 (0,104)	0,63 (0,029)	0,57 (0,104)	<b>0,614</b>
Conservación de biodiversidad	0,11 (0,029)	0,11 (0,029)	0,09 (0,104)	0,11 (0,029)	0,14 (0,104)	<b>0,112</b>
Servicios hidrológicos	0,26 (0,029)	0,26 (0,029)	0,30 (0,104)	0,26 (0,029)	0,29 (0,104)	<b>0,274</b>
<b>Sociales:</b>	0,10 (0,080)	0,10 (0,080)	0,11 (0,048)	0,11 (0,048)	0,10 (0,121)	<b>0,104</b>
Aceptación social	0,32 (0,076)	0,33 (0,093)	0,22 (0,064)	0,43 (0,081)	0,39 (0,107)	<b>0,338</b>
Esparcimiento	0,07 (0,076)	0,10 (0,093)	0,07 (0,064)	0,10 (0,081)	0,12 (0,107)	<b>0,092</b>
Ganadería	0,32 (0,076)	0,36 (0,093)	0,33 (0,064)	0,19 (0,081)	0,25 (0,107)	<b>0,290</b>
Forrajes	0,12 (0,076)	0,06 (0,093)	0,12 (0,064)	0,07 (0,081)	0,17 (0,107)	<b>0,108</b>
Proximidad a poblados	0,17 (0,076)	0,15 (0,093)	0,26 (0,064)	0,22 (0,081)	0,07 (0,107)	<b>0,174</b>
<b>Técnicos:</b>	0,57 (0,080)	0,57 (0,080)	0,58 (0,048)	0,58 (0,048)	0,50 (0,121)	<b>0,560</b>
ICA (m <sup>3</sup> /ha·año)	0,29 (0,104)	0,21 (0,105)	0,21 (0,105)	0,30 (0,104)	0,11 (0,029)	<b>0,224</b>

Volumen	0,14 (0,104)	0,10 (0,105)	0,10 (0,105)	0,09 (0,104)	0,26 (0,029)	<b>0,138</b>
Pendiente	0,57 (0,104)	0,69 (0,105)	0,69 (0,105)	0,61 (0,104)	0,63 (0,029)	<b>0,638</b>

El ranking de pesos de los criterios y subcriterios se muestra en la Tabla 4.11, cuyos valores son el resultado de la emisión de juicios de todos los participantes, y donde se observa que los subcriterios *Pendiente*, *ICA* y *Costos de establecimiento o manejo de la regeneración* fueron los más valorados a la hora de la elección del método de manejo.

**Tabla 4.11:** Ranking porcentual de los pesos de los criterios en la decisión tomada en el ejemplo de aplicación del software MPC<sup>®</sup> 2.01 MEX.

<b>Criterios</b>	
Técnicos	55,9%
Económicos	26,1%
Sociales	10,3%
Ambientales	7,7%
<b>Subcriterios</b>	
Pendiente	35,6%
Incremento Crecimiento Anual (ICA)	12,4%
Costos de establecimiento o manejo de la regeneración	12,3%
Volumen	7,7%
Costos de abastecimiento	6,4%
Ingresos estimados de madera	5,1%
Riesgo de erosión	4,8%
Aceptación social	3,5%
Ganadería	3,0%
Otros ingresos (ecoturismo, caza, carbono, etc.)	2,4%
Servicios hidrológicos	2,1%
Proximidad a poblados	1,7%
Forrajes	1,1%
Esparcimiento	1,0%
Conservación de la biodiversidad	0,9%

Por otra parte, en la Tabla 4.12 se muestran los pesos más consistentes de cada una de las alternativas de manejo bajo cada criterio. En este caso, y puesto que la evaluación de alternativas suponía más tiempo de comparación al decisor, sólo se presentan dos de los cinco decisores anteriores, efectuando tres repeticiones cada uno. En ella puede observarse que el *MMOBI* y el *MDS* destacan bajo gran parte de los criterios, mientras que aplicar *Matarrasa* obtuvo la máxima puntuación bajo el criterio *Ingresos estimados de madera*, y la alternativa *No cortar* fue la más valorada bajo el criterio *Costos de establecimiento o manejo de la regeneración*.

**Tabla 4.12:** Resultados de la evaluación de las alternativas de dos decisores en el ejemplo de aplicación del software MPC<sup>®</sup> 2.01 MEX: pesos e inconsistencias (en paréntesis).

	Alternativa	Decisor 1	Decisor 2
<b>Costos de establecimiento o manejo de la regeneración</b>	MMOBI	0,313 (0,000)	0,303 (0,052)
	MDS	0,313 (0,000)	0,237 (0,052)
	Matarrasa	0,063 (0,000)	0,061 (0,052)
	No cortar	0,313 (0,000)	0,399 (0,052)
<b>Costos de abastecimiento</b>	MMOBI	0,122 (0,052)	0,120 (0,116)
	MDS	0,122 (0,052)	0,120 (0,116)
	Matarrasa	0,283 (0,052)	0,252 (0,116)
	No cortar	0,473 (0,052)	0,509 (0,116)
<b>Ingresos estimados de madera</b>	MMOBI	0,190 (0,090)	0,190 (0,090)
	MDS	0,209 (0,090)	0,209 (0,090)
	Matarrasa	0,540 (0,090)	0,540 (0,090)
	No cortar	0,061 (0,090)	0,061 (0,090)
<b>Otros ingresos (ecoturismo, caza, carbono, etc.)</b>	MMOBI	0,380 (0,053)	0,389 (0,015)
	MDS	0,380 (0,053)	0,389 (0,015)
	Matarrasa	0,062 (0,053)	0,069 (0,015)
	No cortar	0,179 (0,053)	0,153 (0,015)
<b>Riesgo de erosión</b>	MMOBI	0,313 (0,000)	0,321 (0,011)
	MDS	0,313 (0,000)	0,285 (0,011)
	Matarrasa	0,063 (0,000)	0,074 (0,011)
	No cortar	0,313 (0,000)	0,321 (0,011)
<b>Conservación de la biodiversidad</b>	MMOBI	0,313 (0,000)	0,313 (0,000)
	MDS	0,313 (0,000)	0,313 (0,000)
	Matarrasa	0,063 (0,000)	0,063 (0,000)
	No cortar	0,313 (0,000)	0,313 (0,000)
<b>Servicios hidrológicos</b>	MMOBI	0,313 (0,000)	0,313 (0,000)
	MDS	0,313 (0,000)	0,313 (0,000)
	Matarrasa	0,063 (0,000)	0,063 (0,000)
	No cortar	0,313 (0,000)	0,313 (0,000)
<b>Aceptación social</b>	MMOBI	0,543 (0,069)	0,389 (0,015)
	MDS	0,245 (0,069)	0,389 (0,015)
	Matarrasa	0,076 (0,069)	0,069 (0,015)
	No cortar	0,136 (0,069)	0,153 (0,015)

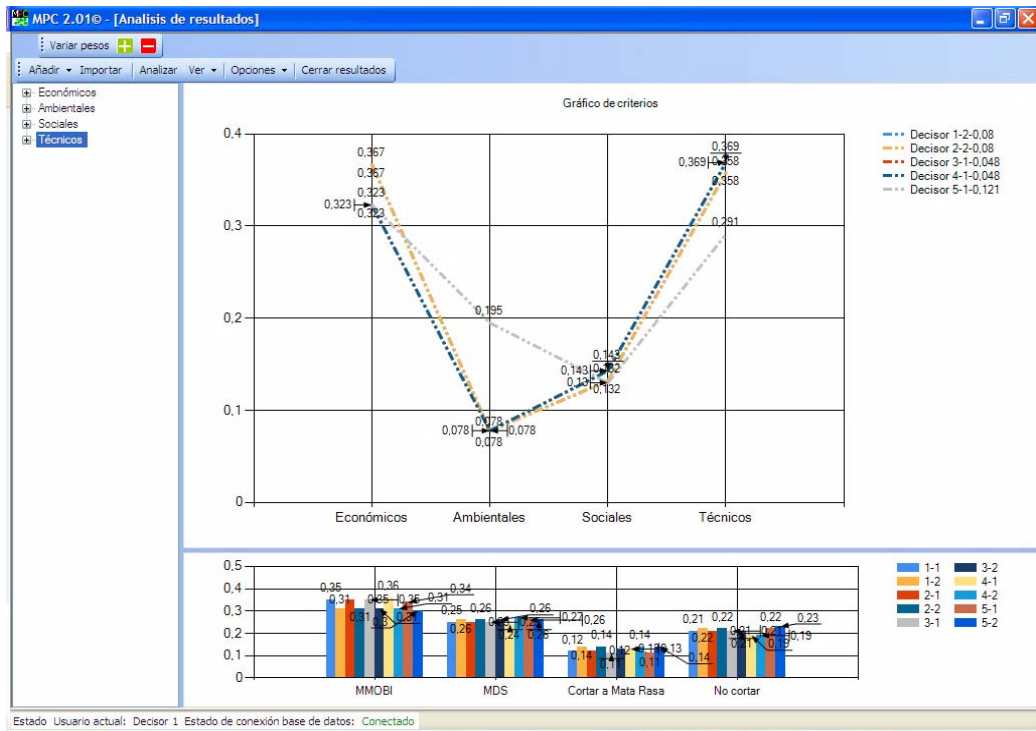
<b>Esparcimiento</b>	MMOBI	0,552 (0,103)	0,411 (0,011)
	MDS	0,248 (0,103)	0,380 (0,011)
	Matarrasa	0,056 (0,103)	0,061 (0,011)
	No cortar	0,143 (0,103)	0,148 (0,011)
<b>Ganadería</b>	MMOBI	0,389 (0,015)	0,365 (0,053)
	MDS	0,389 (0,015)	0,365 (0,053)
	Matarrasa	0,069 (0,015)	0,172 (0,053)
	No cortar	0,153 (0,015)	0,099 (0,053)
<b>Forrajes</b>	MMOBI	0,365 (0,053)	0,411 (0,011)
	MDS	0,365 (0,053)	0,361 (0,011)
	Matarrasa	0,099 (0,053)	0,120 (0,011)
	No cortar	0,172 (0,053)	0,107 (0,011)
<b>Proximidad a poblados</b>	MMOBI	0,491 (0,067)	0,515 (0,047)
	MDS	0,291 (0,067)	0,282 (0,047)
	Matarrasa	0,067 (0,067)	0,058 (0,047)
	No cortar	0,151 (0,067)	0,145 (0,047)
<b>Incremento Crecimiento Anual</b>	MMOBI	0,463 (0,106)	0,389 (0,015)
	MDS	0,273 (0,106)	0,389 (0,015)
	Matarrasa	0,169 (0,106)	0,153 (0,015)
	No cortar	0,096 (0,106)	0,069 (0,015)
<b>Volumen</b>	MMOBI	0,389 (0,015)	0,219 (0,053)
	MDS	0,389 (0,015)	0,219 (0,053)
	Matarrasa	0,153 (0,015)	0,501 (0,053)
	No cortar	0,069 (0,015)	0,062 (0,053)
<b>Pendiente</b>	MMOBI	0,516 (0,041)	0,442 (0,090)
	MDS	0,230 (0,041)	0,306 (0,090)
	Matarrasa	0,049 (0,041)	0,066 (0,090)
	No cortar	0,205 (0,041)	0,187 (0,090)

El programa MPC<sup>®</sup> 2.01 MEX incluye múltiples posibilidades de cálculo matricial para obtener los resultados generales de todo el proceso. Para este ejemplo se decidió interaccionar todas las repeticiones de los pesos de evaluación de criterios con la repetición de evaluación de alternativas bajo cada criterio, con el objetivo de poder apreciar las diferencias entre ellas. Los resultados se muestran en la matriz de decisión (Tabla 4.13), donde puede observarse que el método de manejo *MMOBI* es el que más peso obtuvo como resultado global de todo el proceso de análisis, seguido por el método *MDS*, por *No cortar* y por aplicar la *Matarrasa*, por este orden. Si se tiene en cuenta la variabilidad de pesos entre los usuarios, se puede observar en la misma Tabla 4.13 que la desviación estándar es muy baja, denotando que el resultado obtenido es común a los decisores que participaron.

**Tabla 4.13:** Resultados finales fruto de la combinatoria de los pesos de los criterios y de las alternativas de cada uno de los decisores en el ejemplo de aplicación del software MPC<sup>®</sup> 2.01 MEX.

Combinaciones		MMOBI	MDS	Matarrasa	No cortar
Peso Criterios	Peso Alternativas				
Decisor 1	Decisor 1	0,41	0,27	0,12	0,21
Decisor 1	Decisor 2	0,35	0,29	0,15	0,21
Decisor 2	Decisor 1	0,42	0,27	0,12	0,21
Decisor 2	Decisor 2	0,36	0,29	0,14	0,21
Decisor 3	Decisor 1	0,42	0,26	0,11	0,21
Decisor 3	Decisor 2	0,36	0,29	0,14	0,21
Decisor 4	Decisor 1	0,42	0,26	0,13	0,19
Decisor 4	Decisor 2	0,36	0,3	0,15	0,19
Decisor 5	Decisor 1	0,39	0,28	0,11	0,22
Decisor 5	Decisor 2	0,34	0,28	0,16	0,22
<b>Promedio</b>		<b>0,382</b>	<b>0,278</b>	<b>0,133</b>	<b>0,207</b>
<b>Desviación estándar</b>		<b>0,032</b>	<b>0,014</b>	<b>0,018</b>	<b>0,010</b>

Una vez obtenidos los resultados generales, se realizó un análisis de sensibilidad variando los pesos obtenidos de los criterios. En la Figura 4.5 se puede observar que, por ejemplo, al disminuir un 20% el peso del conjunto de criterios técnicos establecidos, la jerarquía no varía, pero las alternativas *Matarrasa* y *No cortar* suben de peso mientras que el *MDS* y el *MMOBI* disminuyen su importancia. El análisis de sensibilidad ayuda en este caso al decisor a determinar la rigidez de la jerarquía final.



**Figura 4.5:** Ventana del software MPC<sup>®</sup> 2.01 MEX donde se muestra un ejemplo del análisis de sensibilidad del caso estudiado.

#### 4.4.3 Discusión

El programa MPC<sup>®</sup> puede ser fácilmente adaptado a casos particulares de toma de decisiones frecuentes o repetitivas, como es la selección del mejor método de manejo forestal en rodales del estado de Durango (México) que se ha presentado en el ejemplo. Por defecto MPC<sup>®</sup> permite que el usuario diseñe de forma totalmente libre su propio esquema de criterios y alternativas, pero en ciertos casos como el analizado puede ser muy conveniente, e incluso necesario, diseñar versiones específicas estableciendo un listado cerrado de criterios y alternativas, y permitir solamente al usuario utilizar o descartar algunos de ellos (o incluso no darle esta posibilidad).

El número de decisores seleccionado en este ejemplo fue arbitrario, pero se recomienda que una decisión sea tomada por un grupo de expertos multidisciplinar, para incorporar diversos puntos de vista. También es necesario tener en cuenta el coste del proceso de decisión. Además, el número de repeticiones también es arbitrario, y puede ser aumentado por las

características de la herramienta desarrollada, por lo que no es rígido, quedando a expensas del responsable de la decisión aumentarlo si lo estima oportuno.

Sin embargo, en decisiones grupales y con varias repeticiones de cada decisor, resulta fundamental eliminar aquellas decisiones inconsistentes para aumentar la validez de la decisión final.





*Si buscas resultados distintos, no hagas siempre lo mismo*

Albert Einstein





# Capítulo 5

---

## 5 EL MÉTODO DEL TRIÁNGULO DE CALIFICACIONES (MTC<sup>®</sup>)

### 5.1 Introducción

Como ya se ha visto en los capítulos anteriores, en un proceso de decisión multicriterio no sólo es vital establecer qué criterios y qué alternativas van a considerarse, sino también cuantificar el peso relativo y la representatividad de cada uno de ellos. Por esa razón, se ha de tener en cuenta la naturaleza humana de los decisores en todo el proceso de la decisión, con especial importancia en la emisión de juicios, y considerando el coste asumible del proceso (Barzilai *et al.* 1987, Buchanan *et al.* 1998, Tam *et al.* 2006, Martínez 2007).

Con respecto a la emisión de juicios, también se ha comentado anteriormente que la metodología AHP se basa en la comparación pareada bajo una escala, aplicándose el axioma de *juicios recíprocos* que, sin embargo, puede no cumplirse, especialmente en las decisiones con gran cantidad de criterios y/o alternativas, que son largas y tediosas, y en aquellas en las que intervienen criterios de naturaleza subjetiva, difíciles de evaluar (ver apartado 3.2.2.1).

Además, en muchos casos el decisor puede no conocer o entender la escala que utiliza el método AHP (ver apartado 3.2.2.1), o bien, aunque esté familiarizado con la misma, le puede resultar difícil aplicarla en comparaciones de criterios o alternativas que nunca ha enfrentado, como también se ha comentado.

Debido a estas limitaciones del método AHP, y a las otras sintetizadas en el apartado 3.5, en este capítulo se presenta y describe el *Método del Triángulo de Calificaciones* (MTC<sup>®</sup>), que es una nueva metodología de toma de decisiones multicriterio que utiliza la comparación por tríos para tratar de resolver los comentados inconvenientes de la comparación por pares del método AHP (Pérez-Rodríguez y Rojo-Alboreca 2009, 2012b). Para ello, en primer lugar, con el MTC<sup>®</sup> se pretende disminuir el elevado número de pares o parejas que es preciso evaluar en la aplicación del método AHP cuando se cuenta con numerosos criterios y/o alternativas; y

en segundo lugar también se busca ampliar la representatividad de los pesos de los criterios y de las alternativas, tratando así de minimizar los sesgos que se puedan producir en el proceso repetitivo de la emisión de juicios. Este último aspecto resulta fundamental, puesto que el primer paso para la toma de una decisión es percibirla para poder emitir un juicio certero, y si esta percepción está distorsionada la decisión posterior también lo estará, perdiéndose la precisión que se desearía en la decisión global al producirse inconsistencias. En este campo es muy amplia la bibliografía que se puede encontrar sobre la percepción, post-percepción, atención y memoria visual (por ejemplo: He *et al.* 1997, Bundesen 1998, Cavanagh 1999, Cavanagh *et al.* 1999, 2001, Bechara 2003).

Los objetivos concretos que se han perseguido con el MTC<sup>®</sup> han sido:

- Desarrollar una metodología de captura de juicios consistentes, basada en la transitividad.
- Establecer series automatizadas de comparación de criterios y alternativas.
- Desarrollar algoritmos de cálculo para establecer los resultados de la captura de juicios.
- Componer los intervalos de confianza de cada uno de los criterios y de las alternativas bajo cada criterio, considerando un nivel de significación dado.

## 5.2 Terminología

Con el fin de facilitar la interpretación de la metodología que a continuación se expone, es necesario aclarar y comentar la terminología utilizada en este capítulo.

R es un término matemático que significa relación. Por ejemplo,  $C_1RC_2$  expresa la relación que  $C_1$  tiene con respecto a  $C_2$ .

Con respecto a los criterios y las alternativas, se indicará como  $C_n$  a un conjunto de criterios ( $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$ ) y como  $A_m$  a un grupo de alternativas ( $A_1, A_2, A_3, \dots, A_m$ ) en un mismo nivel, esto es, sin subniveles. Un triángulo T vendrá definido, por ejemplo, como  $C_{123}$ , donde 1, 2 y 3 son los vértices que corresponden, en este caso, a los criterios de la posición 1, 2 y 3 respectivamente en el conjunto de  $C_n$ . Lo mismo para los triángulos definidos por  $A_{123}$  bajo

un criterio dado. Se denotarán como  $C_{abc}$  o  $A_{abc}$  aquellos triángulos cuyos vértices están definidos bajo una serie que dota de valores a los vértices  $a$ ,  $b$  y  $c$ .

Finalmente, se denominarán  $WC_i$  y  $WC_iA_k$  los vectores de los valores obtenidos de la evaluación de los triángulos referidos al criterio  $C_i$ , y a la alternativa  $A_k$  bajo la influencia del criterio  $C_i$ , respectivamente.

### 5.3 Metodología

En este apartado se describe la nueva metodología de toma de decisiones multicriterio denominada *Método del Triángulo de Calificaciones* (MTC<sup>®</sup>), basada en la comparación por tríos (triángulos) en vez de por pares, como se ha comentado anteriormente. MTC<sup>®</sup> se ha desarrollado a partir de dos principios axiomáticos, que están relacionados con la emisión de juicios consistentes al realizar la evaluación por tríos (*transitividad*) y con la variabilidad del juicio cuando cambia uno de los tres elementos comparados (*variabilidad temporal de la opinión*). Otro de los principios básicos del MTC<sup>®</sup> es el establecimiento de unas *superficies de opinión* (de dos dimensiones) y de unas *regiones de probabilidad de las opiniones* (de tres dimensiones), para cuya construcción se proponen, analizan y comparan tres hipótesis.

#### 5.3.1 Emisión de juicios consistentes por comparación de tríos

El primer axioma en el que se sustenta la metodología MTC<sup>®</sup> es el siguiente:

**Axioma 1: Transitividad:** *En un contexto de homogeneidad en el que los elementos que se comparan son del mismo orden de magnitud, si un criterio  $C_1$  es preferido a un criterio  $C_2$  y ese mismo criterio  $C_2$  es preferido a un criterio  $C_3$ , entonces el criterio  $C_1$  debe ser preferido al criterio  $C_3$  en la misma escala en la que han sido evaluados los dos anteriores. Es decir:*

$$\forall C_1, C_2, C_3 \in C : C_1RC_2 \wedge C_2RC_3 \rightarrow C_1RC_3$$

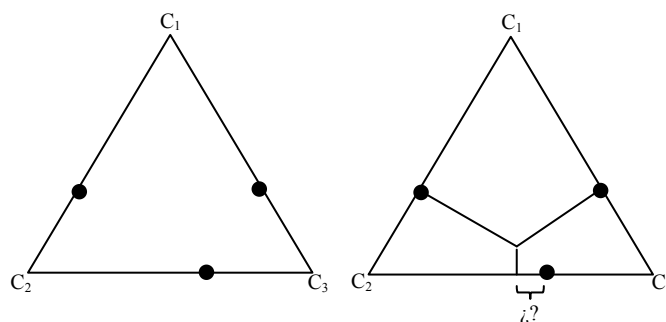
Según este *Axioma 1* o de *transitividad*, cuando se comparan dos criterios cualesquiera  $C_1$  y  $C_2$  (o dos alternativas bajo la influencia de un criterio), se obtiene mediante una escala una magnitud que expresa la importancia que para el decisor tiene uno con respecto al otro. Lo mismo ocurre en el caso de comparar los criterios  $C_2$  y  $C_3$ . En el caso de evaluar de la misma

manera los  $C_1$  y  $C_3$  se cerraría el ciclo de las relaciones de los tres criterios  $C_1$ ,  $C_2$  y  $C_3$ . Así, debiera ser lógico que si el criterio  $C_1$  es preferido respecto al  $C_2$  y el criterio  $C_2$  es preferido respecto al  $C_3$ , entonces, en consecuencia, el criterio  $C_1$  debiera ser preferido al  $C_3$ , todo ello en un contexto en el que no existan sinergias entre las relaciones.

Esta evidente y lógica relación transitiva puede no cumplirse en el método AHP de comparación por pares ya que, como se ha indicado en capítulos anteriores, se puede cometer cierto exceso o defecto en la valoración relativa de alguno de los pares por diversos motivos (inadecuado uso de la escala, error en la evaluación, opinión confusa sobre el par comparado, etc.), llegando entonces a un resultado ilógico o no previsible, desembocando en una inconsistencia (Saaty 1980, 1990). Además, esta inconsistencia es un indicador a nivel matricial que sólo informa de si la matriz que aúna todas las comparaciones es homogénea, y si se puede utilizar (es consistente cuando  $CR \leq 0,10$ ) o descartar (es inconsistente cuando  $CR > 0,10$ ) en el proceso de cálculo final (ver apartado 3.2.2.2), aunque algunos autores como Osei-Brisson (2006) denotan que este indicador carece de interpretación.

Cabría la posibilidad de obtener directamente la relación de los anteriormente mencionados  $C_1$  y  $C_3$  sin tener que considerar la evaluación de dicho par explícitamente, pero esto es complicado en el método AHP, pues se desconoce en qué par se está cometiendo el error de evaluación del peso. En la Figura 5.1 se muestra gráficamente el problema expuesto, representando las comparaciones realizadas por pares de manera independiente sobre un triángulo equilátero formado por tres criterios ( $C_1$ ,  $C_2$  y  $C_3$ ). Los puntos negros en cada lado del triángulo representan los juicios de un decisor correspondientes a las distintas parejas de criterios situados en sus vértices. En dicha Figura se muestra que es posible proyectar un error, si en uno de los pares, sin especificar, se hubiera realizado una valoración en exceso o defecto. Así pues, la diferencia entre el peso previsible o lógico y el peso obtenido, que en la Figura 5.1 se ha proyectado en el par formado por los criterios  $C_2$  y  $C_3$ , podría haberse proyectado en cualquiera de los lados del triángulo, puesto que se desconoce su distribución en los pares que lo forman.

Por ello se hace necesario establecer una metodología de emisión de juicios consistentes basándose en el *Axioma 1* o de *transitividad*, que evite la incorporación de juicios ilógicos o no previsibles en los cálculos globales.

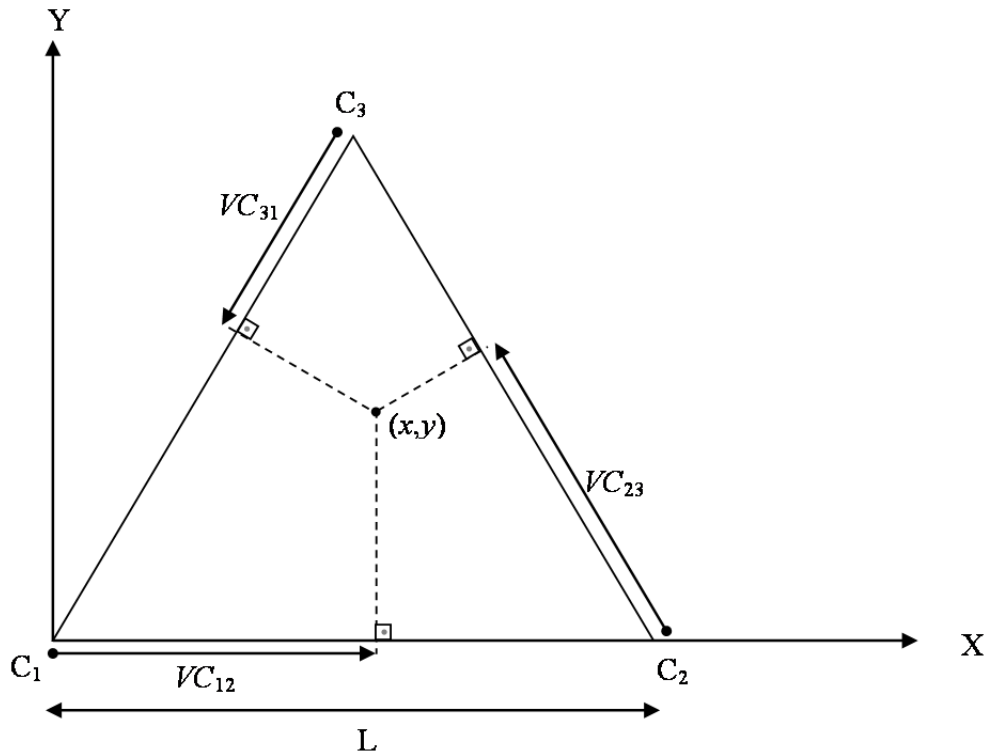


**Figura 5.1:** Representación gráfica del posible error cometido en la calificación por pares de tres criterios por el método AHP (proyectado arbitrariamente en un lado del triángulo formado).

En esta tesis se presenta como posible solución la mejora del sistema de emisión de juicios mediante la comparación de criterios o alternativas por tríos en vez de por parejas, lo que constituye la base del método MTC<sup>®</sup> por cumplimiento del *Axioma 1*. Así, el decisor ha de emitir su juicio con respecto a tres pares a la vez, siendo esta valoración más compleja, pero asumiendo que la inconsistencia en ese trío de pares comparados es cero (por estricta transitividad). Ese trío de pares a comparar se puede asimilar geoméricamente a un triángulo equilátero como el de la Figura 5.2, en el cual cada vértice representa un criterio (por ejemplo los criterios  $C_1$ ,  $C_2$  y  $C_3$ ), y en cuya superficie se tienen todas las posibles relaciones de comparación.

En esa Figura 5.2 el punto definido como  $(x,y)$  representa el juicio de un decisor en base a los criterios  $C_1$ ,  $C_2$  y  $C_3$  que forman el triángulo equilátero caracterizado por la magnitud de uno de sus lados, por ejemplo su base  $L = (X_{c_2} - X_{c_1})$ .

Proyectando el punto  $(x,y)$  perpendicularmente a los lados del triángulo se definen (en base a la graduación prefijada por  $L$ ) las magnitudes de preferencia o de comparación ( $VC_{ij}$ ) de los pares de criterios, que implícita y estrictamente cumplen el comentado *Axioma 1*.



**Figura 5.2:** Esquema del triángulo de calificaciones, base de la metodología MTC<sup>©</sup>.

Matemáticamente, con el resultado de la evaluación en el triángulo  $C_{123}$  se puede establecer un vector resultado, que es un vector composicional formado por tres elementos ( $VC_{12}$ ,  $VC_{23}$ ,  $VC_{31}$ ) cuya suma es una constante, tal y como se expone en la siguiente ecuación:

$$(VC_{12} + VC_{23} + VC_{31}) = \frac{2\delta}{3} \quad VC_{ij} \in [0, \delta] \quad [\text{Ec. 5.1}]$$

Esta Ecuación 5.1 está definida para evaluaciones acotadas en un intervalo arbitrario  $[0, \delta]$  que debe ser prefijado para una decisión dada, siendo cero el extremo inferior de la comparación del par y  $\delta$  el máximo (que ha de ser constante en todo el proceso decisional y en las posibles siguientes repeticiones).

A la hora de analizar los datos del vector resultado, diversos autores (como por ejemplo Mateu-Figueras *et al.* 2003) explican en sus trabajos la complejidad de analizar estadísticamente los datos de los vectores composicionales, siendo el principal problema que la suma entre sus componentes es constante. Sin embargo, que esta suma sea constante es

lógico y necesario, como se ha mencionado en el *Axioma 1*, por lo que esa complejidad ha de ser tenida en cuenta a la hora de establecer los análisis estadísticos de esos vectores composicionales.

Las magnitudes de comparación ( $VC_{ij}$ ) de los pares de criterios del triángulo se calculan, de manera simultánea y cumpliéndose estrictamente la transitividad, mediante el siguiente conjunto de Ecuaciones 5.2:

$$VC_{12} = (x / (x_{C_1} - x_{C_2})) \cdot \delta$$

$$VC_{23} = \frac{\sqrt{\left(\frac{(x_{C_1} - x_{C_2})}{2} - x_s\right)^2 + (y_s)^2}}{(x_{C_1} - x_{C_2})} \cdot \delta$$

$$VC_{31} = \frac{2 \cdot \delta}{3} - (VC_{12} + VC_{23})$$

$$\text{donde: } x_s = \frac{y - \tan\left(\frac{\pi}{6}\right) \cdot x - \tan\left(\frac{\pi}{3}\right) \cdot (x_{C_1} - x_{C_2})}{-\tan\left(\frac{\pi}{3}\right) + \tan\left(\frac{\pi}{6}\right)}$$

$$y_s = -\tan\left(\frac{\pi}{3}\right) \cdot x_s + \tan\left(\frac{\pi}{3}\right) \cdot (x_{C_1} - x_{C_2})$$

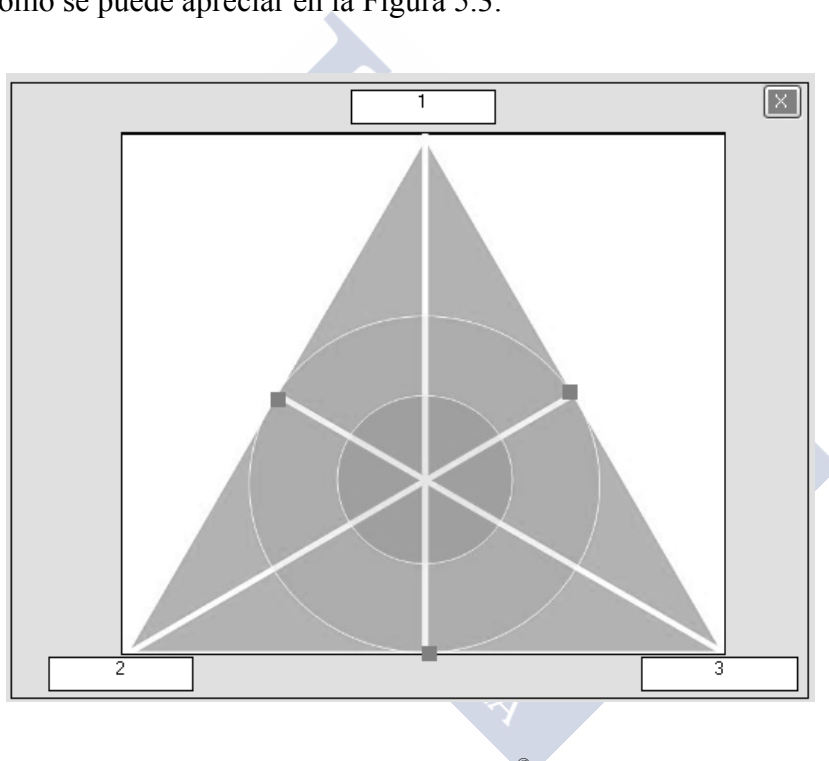
[Ec. 5.2]

En la evaluación sobre un triángulo, cuando un decisor opina que un criterio tiene mucho más peso que los otros dos, el punto  $(x, y)$  se aproxima al vértice del criterio preferido, que obtiene la mayor valoración y hace que los criterios que conforman los restantes vértices igualen su preferencia entre ellos, por cumplimiento de la transitividad. En el caso contrario, si  $(x, y)$  está próximo al centro del triángulo, las preferencias entre los tres criterios se igualan.

Esta relación lógica entre tres criterios es relativamente sencilla de establecer mediante un triángulo equilátero, pero se complicaría extraordinariamente si se deseara hacer lo mismo con cuatro criterios, ya que en ese caso la evaluación tendría que realizarse en una pirámide equilátera tridimensional. Eso supondría perder la manejabilidad y facilidad de la evaluación en un software informático que se muestra en una pantalla, aparte de que la propia decisión, comparando simultáneamente seis posibles pares de criterios (combinaciones de cuatro criterios elegidos de dos en dos), sería muy compleja y resultaría casi inabordable, y también

se complicaría todo el proceso de cálculo posterior. Lógicamente, la decisión y cálculo serían todavía mucho más difíciles por encima de cuatro criterios.

Por otra parte, la evaluación de tríos de criterios (o de alternativas) situados en los vértices de triángulos tiene la ventaja adicional de eliminar o hacer innecesaria la escala de comparación, ya que lo que se le pide a un decisor es que emita su juicio según la tendencia en una superficie, evitándose así los ya comentados inconvenientes que en ocasiones surgen con la escala en el método AHP (Salo & Hämäläinen 1997, Finan & Hurley 1997). A efectos prácticos, para facilitar al decisor la evaluación de los triángulos basta con señalar en los mismos unas líneas perpendiculares a cada lado, que se juntan en el centro, y unos círculos concéntricos, como se puede apreciar en la Figura 5.3.



**Figura 5.3:** Triángulo de calificaciones de la metodología MTC<sup>®</sup> con las líneas y círculos de referencia para facilitar su evaluación.

### 5.3.2 Series de comparación: Resolución MTC<sup>®</sup> para un número $n$ de criterios

Una vez que se emite el juicio en un triángulo se asume que en esa triada la inconsistencia es cero, pero sin embargo es necesario tener en cuenta la variabilidad del juicio en la comparación de los criterios y/o alternativas evaluadas en una decisión, ya que un juicio con respecto a un par puede cambiar según el tercer criterio que entra en juego. Esto es, el par de

criterios  $C_1$  y  $C_2$  puede obtener un peso en la evaluación del triángulo formado por los criterios  $C_1$ ,  $C_2$  y  $C_3$ , pero cuando se evalúa el triángulo donde se mantiene el par  $C_1$  y  $C_2$ , pero se cambia el tercer vértice por un cuarto criterio  $C_4$ , es decir, el triángulo formado por los criterios  $C_4$ ,  $C_1$  y  $C_2$ , el resultado del peso del par  $C_1$  y  $C_2$  no tiene por qué ser el mismo que el obtenido en el triángulo inicialmente evaluado. Esto ocurre especialmente cuando el número de criterios es elevado, ya que es complejo que el decisor escale su opinión sobre un grupo de criterios y refleje de manera precisa cada valor de comparación en cada triángulo, al igual que sucede en la comparación por pares.

El segundo axioma en el que se sustenta la metodología MTC<sup>®</sup>, que está relacionado con esta temática, es el siguiente:

**Axioma 2: Variabilidad temporal de la opinión:** *en toda evaluación de criterios o alternativas el decisor está afectado/influido por el ambiente y por el contexto de la decisión, que pueden provocar confusión y distorsión en sus evaluaciones, especialmente en el caso de criterios o alternativas con carácter subjetivo o de opinión, todo lo cual generalmente se agrava según se incrementa la duración de la decisión.*

Según el *Axioma 2*, el factor tiempo es importante y ha de tenerse en cuenta en toda decisión, ya que puede existir una variabilidad temporal en la opinión de los criterios y alternativas debida, fundamentalmente, a que una decisión dura un periodo de tiempo determinado.

Matemáticamente, el *Axioma 2* se puede expresar de la siguiente manera (Ecuación 5.3):

$$VC_{ij}(t) = \delta - VC_{ji}(t+1) \pm \varepsilon \quad [\text{Ec. 5.3}]$$

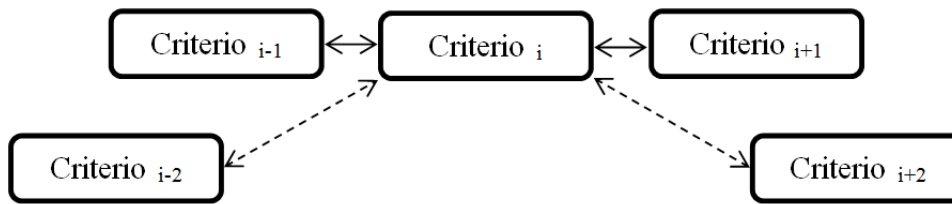
donde  $\delta$  es el valor máximo que puede tener la comparación entre criterios y  $\varepsilon$  es la incertidumbre que un decisor tiene con respecto a un criterio o una alternativa bajo un criterio.

En el caso de un número de criterios  $n$  superior a tres en un mismo nivel, en el MTC<sup>®</sup> se divide el esquema decisional en múltiples triángulos de evaluación, de forma que todos los criterios son evaluados implícita o explícitamente. Es decir, si un par no es evaluado directamente se debe poder extraer su valor de manera representativa a través de los pares sí evaluados. Para ello se propone la serie de comparación para un triángulo cuyos vértices son

los criterios  $C_a, C_b, C_c$ , donde los subíndices  $a, b$  y  $c$  vienen dados por la Ecuación 5.4 e indican qué criterio del conjunto  $C = [C_1, C_2, C_3, \dots, C_n]$  se está exponiendo para ser evaluado.

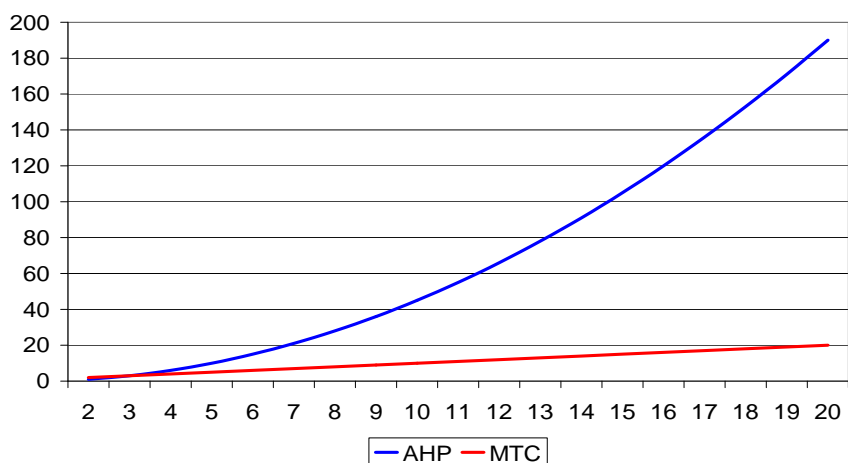
$$\begin{aligned}
 &a = i \in [1, n] \cap \mathbb{N} \\
 &\begin{cases} b = (i+1) - n \Leftarrow i+1 > n \\ b = i+1 \Leftarrow i+1 \leq n \end{cases} \\
 &\begin{cases} c = (i+2) - n \Leftarrow i+2 > n \\ c = i+2 \Leftarrow i+2 \leq n \end{cases}
 \end{aligned}
 \tag{Ec. 5.4}$$

Bajo esta serie, un esquema decisional de, por ejemplo, un nivel de criterios, es evaluado en triadas en un proceso cíclico o cerrado, ya que se vuelve al punto de partida, en el cual un criterio  $C_i$  es comparado con respecto a sus dos vecinos más cercanos de primer nivel ( $C_{i-1}$  y  $C_{i+1}$ ), y en otras dos evaluaciones con sus vecinos de segundo nivel ( $C_{i-2}$  y  $C_{i+2}$ ). El esquema de esta evaluación se puede ver en la Figura 5.4.



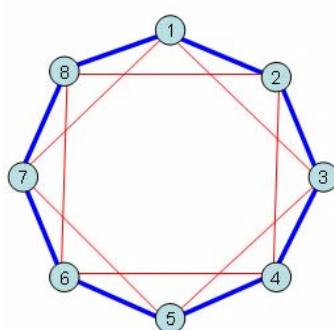
**Figura 5.4:** Relaciones evaluadas mediante la serie de comparación determinada para un criterio genérico  $C_i$ .

Por ejemplo, en el caso de ocho criterios, se construirían los triángulos de la siguiente manera:  $C_1-C_2-C_3; C_2-C_3-C_4; \dots; C_7-C_8-C_1$  y  $C_8-C_1-C_2$ . Como se puede observar, se obtienen ocho triangulaciones (8·3) o, lo que es lo mismo, ocho tríos de criterios. De esta manera, la reducción del tiempo en la toma de decisiones con el MTC<sup>®</sup> es importante, ya que en el ejemplo se evalúan ocho triángulos en vez de los 28 pares que sería necesario comparar en el AHP. Esta es una de las ventajas importantes del MTC<sup>®</sup>, y en la Figura 5.5 puede observarse una comparación entre el número de pares de comparaciones a realizar en el método AHP y el número de triángulos en el método MTC<sup>®</sup> en función del número de criterios considerados en la decisión.



**Figura 5.5:** Comparación del número de pares de decisiones a realizar en el método AHP y el número de triángulos en el método MTC<sup>®</sup>, según el número de criterios implicados en la decisión.

Siguiendo con el ejemplo, si se desarrollan los pares de los ocho triángulos por el método MTC<sup>®</sup>, se obtienen los resultados de la comparación de 24 pares, por lo que no se consiguen todas las relaciones necesarias para poder adaptar este sistema a una matriz cuadrada de relaciones. No obstante, hay pares que se repiten. Así pues, esta triangulación responde a una figura geométrica, y si se distribuyen en un círculo los criterios y se dibujan todas las relaciones del esquema anterior, en el caso de ocho criterios se obtiene un octágono, como se puede observar en la Figura 5.6.



**Figura 5.6:** Representación gráfica de las relaciones por tríos en el método MTC<sup>®</sup>, en el caso de ocho criterios, que se corresponde con un octágono.

En el perímetro de dicho octágono se muestran, en trazo grueso, las relaciones entre pares que se obtienen por duplicado, y en trazo fino las que se obtienen una vez. Esta configuración permite que los vértices de los triángulos roten y, por tanto, que la posición de los pares sea diferente en cada triángulo, minimizando con ello el efecto de memoria visual que se pueda tener del par anterior en pares que se repiten, por lo que esta nueva repetición será independiente de la anteriormente realizada y caracterizará la precisión del peso de los pares evaluados.

### 5.3.3 Construcción de los vectores de opinión

Con las series definidas de la sucesión de triángulos se pretende determinar cómo varía el peso de un par dado con respecto a la calificación de ese mismo par en triángulos sucesivos, o lo que es lo mismo, bajo la influencia de un tercer criterio diferente al del primer triángulo. Al completarse esa serie se puede asumir que la calificación se ha escalado para todos los pares evaluados, ya que se ha cerrado el ciclo comparativo de triángulos de inconsistencia cero para todos los criterios.

Bajo esta serie, y considerando dos evaluaciones contiguas de los tríos, por ejemplo  $(C_1, C_2, C_3)$  y  $(C_2, C_3, C_4)$ , se obtendrían  $VC_{12}$ ,  $VC_{23}$  y  $VC_{31}$  del primero y  $VC'_{23}$ ,  $VC_{34}$  y  $VC_{42}$  del segundo.

En este caso  $VC_{23} = \delta - VC'_{23} + \varepsilon_{23}$ , siendo  $\delta$  el valor máximo que puede tener la comparación entre criterios y  $\varepsilon_{23}$  el error que se puede cometer en la evaluación del par  $C_2, C_3$  en los triángulos. Si  $VC_{23} = \delta - VC'_{23}$  entonces  $\varepsilon_{23} = 0$ , lo que significaría que la evaluación de ese mismo par habría obtenido el mismo peso en las dos distintas evaluaciones. Sin embargo, hay que tener en cuenta que un par de criterios puede cambiar su peso en una evaluación dependiendo del tercer criterio con el que es comparado.

Fruto de la serie de evaluación propuesta se obtienen  $n$  vectores, que se van a denominar *vectores de opinión* (que serán de seis elementos cada uno para el ejemplo seguido con ocho criterios), los cuales tienen en común que son evaluaciones de un mismo criterio con respecto a otros. Por ejemplo, el vector que se obtiene para el criterio  $C_1$  para un conjunto de ocho criterios es:  $(VC_{12}, VC'_{12}, VC_{13}, VC_{18}, VC_{17}, VC'_{17})$ , teniendo en cuenta que  $VC_{ij} = \delta - VC_{ji}$ , ya que esa evaluación puede asimilarse como recíproca para un mismo instante dentro de una

evaluación de una duración determinada. De forma genérica, el vector se muestra en la Ecuación 5.5:

$$\mathbf{WC}_i = (VC_{i,i-2}, VC_{i,i+1}, VC'_{i,i+1}, [\delta - VC_{i-1,i}], [\delta - VC'_{i-1,i}], [\delta - VC_{i+2,i}]) \quad [\text{Ec. 5.5}]$$

donde se han de cumplir las siguientes condiciones:

$$\begin{cases} (i+2) - n \Leftarrow (i+2) > n \\ (i+1) - n \Leftarrow (i+1) > n \\ n - (1-i) \Leftarrow (i-1) \leq 0 \\ n - (2-i) \Leftarrow (i-2) \leq 0 \end{cases}$$

siendo  $n$  el número de criterios considerados en la decisión.

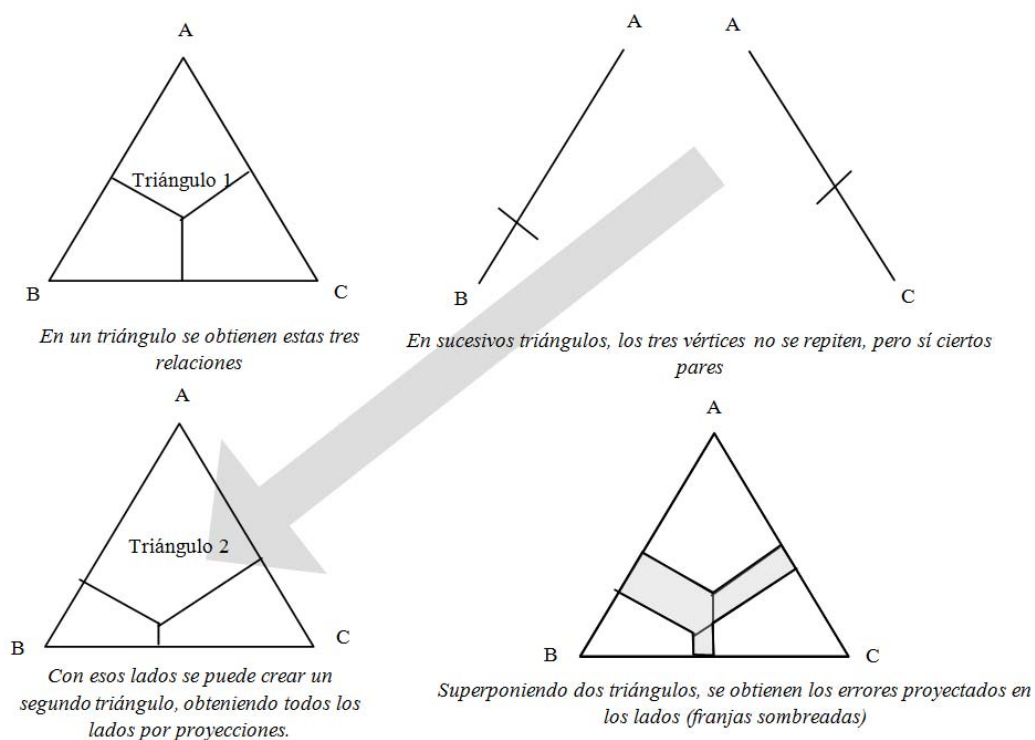
De manera similar, se podrían utilizar matrices para ordenar los datos por ajustarse de manera natural a los subíndices de las series de comparación definidas. En estas matrices se ordenan los pesos de los pares obtenidos en los triángulos, quedando vacíos aquellos lugares donde no se ha efectuado ninguna evaluación directa de criterios, y también la diagonal, ya que supondría la comparación de un criterio consigo mismo. Por tanto, en la matriz de comparaciones de criterios del método MTC<sup>®</sup>, que se anota como  $\mathbf{C}$  y donde  $C^{[ij]} = VC_{ij}$ , la diagonal está formada por ceros, es decir que  $\forall VC_{ij} \rightarrow i = j \Rightarrow VC_{ij} = 0$ , y el resto sólo se rellena con los valores estimados directamente en las comparaciones de tríos. Por ejemplo, en la Ecuación 5.6 se muestra la morfología de dicha matriz para un número de criterios  $n = 8$ .

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & VC_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & (VC_{18}, VC'_{18}) \\ (VC_{21}, VC'_{21}) & 0 & 0 & VC_{24} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (VC_{32}, VC'_{32}) & 0 & 0 & VC_{35} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (VC_{43}, VC'_{43}) & 0 & 0 & VC_{46} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (VC_{54}, VC'_{54}) & 0 & 0 & VC_{57} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (VC_{65}, VC'_{65}) & 0 & 0 & VC_{68} \\ VC_{71} & 0 & 0 & 0 & 0 & (VC_{76}, VC'_{76}) & 0 & 0 \\ 0 & VC_{82} & 0 & 0 & 0 & 0 & (VC_{87}, VC'_{87}) & 0 \end{pmatrix} \quad [\text{Ec 5.6}]$$

La diferencia entre ordenar los datos en matrices o en vectores es que en estos últimos se evita tener elementos iguales a cero, además de que en los vectores ya se establecen los elementos

que caracterizan a un criterio dado y que han sido evaluados directamente, que son los que en este trabajo se utilizan para la evaluación de los rangos de opinión.

A partir del vector  $WC_i$  (ver Ecuación 5.5) se pueden obtener de forma estadística los rangos de las relaciones que se han considerado una sola vez, pues están dentro de triángulos cuyos lados están formados por relaciones duplicadas. Para obtener las relaciones de los pares que no se han evaluado se realiza una triangulación, cerrando el lado o la relación que se desconoce con dos lados que se conocen y que se han obtenido por duplicado, puesto que se han repetido. De esta manera se puede también calcular el rango del valor de los pares no evaluados directamente, pues se puede obtener la misma relación con diferentes triángulos dependiendo de los lados que se escojan. Dicho procedimiento de cálculo de incertidumbre se muestra gráficamente en la Figura 5.7.



**Figura 5.7:** Procedimiento de obtención de incertidumbres de pesos en el método MTC<sup>®</sup>, en el cual sólo se utiliza una repetición de dos pares, siendo el otro estimado por la construcción de otro triángulo a partir de ellos.

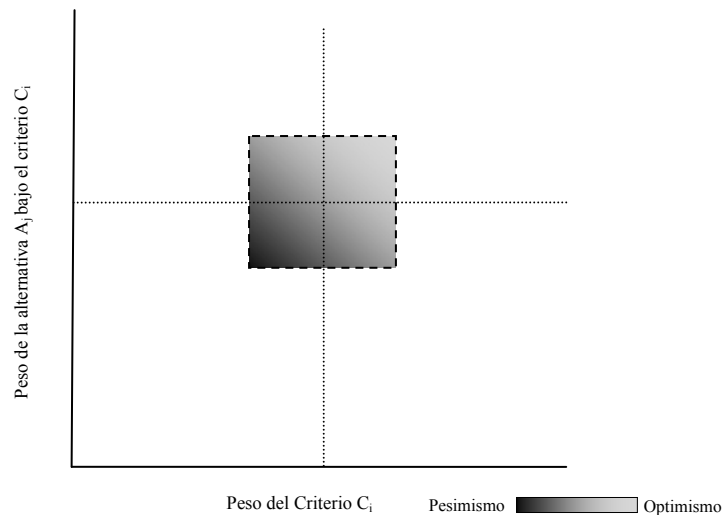
Evidentemente, todo lo referenciado en este apartado para la evaluación de criterios es igualmente aplicable en MTC® a la comparación por tríos de las alternativas bajo cada criterio.

#### **5.3.4 Establecimiento de las superficies de opinión y de las regiones de probabilidad de las opiniones**

Como ya se ha indicado, los *vectores de opinión* que se obtienen como resultado de las evaluaciones de la serie completa de triángulos muestran que una opinión puede variar según los criterios que entren en juego, pero también puede variar según el factor tiempo. Así pues, la opinión de un decisor con respecto a un criterio no debería ser asimilada a un valor discreto, sino a un rango o intervalo dentro del cual se pueda asegurar que, con cierta probabilidad, se encuentra dicha opinión. Sin embargo, y como se indicó anteriormente, los vectores de opinión poseen un número pequeño de elementos (seis para el ejemplo seguido con ocho criterios), que no son suficientes para establecer una distribución representativa de la opinión.

Por ello, todas las posibilidades de opinión que un decisor tiene acerca de un criterio y de una alternativa bajo la influencia de ese criterio se pueden encerrar en una *superficie de opinión*, que estará delimitada por los rangos o intervalos obtenidos para dichos criterio y alternativa. Esa superficie representa todo el dominio donde el peso de la alternativa bajo el criterio considerado se puede mover como resultado de las repeticiones efectuadas, y como se indicará en los apartados siguientes, puede ser un rectángulo, una elipse o alguna figura semejante. En sucesivas repeticiones estas superficies de opinión se pueden ir acotando, en el caso de que se superpongan, por lo que pueden variar su posición y superficie. Así, proporcionan información de cómo afectan las repeticiones en el tiempo a la decisión, y en el caso de decisiones en grupo se puede valorar el grado de uniformidad existente en las mismas.

La formación de las superficies de opinión lleva asociada una zonificación según el optimismo (zonas de mayor peso) o pesimismo (zonas de menor peso) del decisor respecto al criterio y a la alternativa correspondientes, tal y como se muestra en la Figura 5.8 para el caso de que la superficie de opinión se haya establecido como un rectángulo.



**Figura 5.8:** Zonificación del optimismo/pesimismo del peso de un criterio y de una alternativa bajo ese criterio para la superficie de opinión de un decisor, en el caso de un rectángulo.

Por otra parte, se puede asignar a cada punto del interior de una superficie de opinión una probabilidad de suceso, y con ello es posible construir unas *regiones de probabilidad de las opiniones* de tres dimensiones (peso del criterio, peso de la alternativa y probabilidad de suceso), que encierran todos los posibles juicios de un decisor. Como se indicará en los apartados siguientes, y dependiendo de la distribución de probabilidades que se asuma, dichas regiones pueden ser paralelepípedos (si la superficie de opinión se ha establecido como un rectángulo), paraboloides elípticos (que correspondería a elipses como superficies de opinión), o bien alguna figura similar o mezcla de las anteriores.

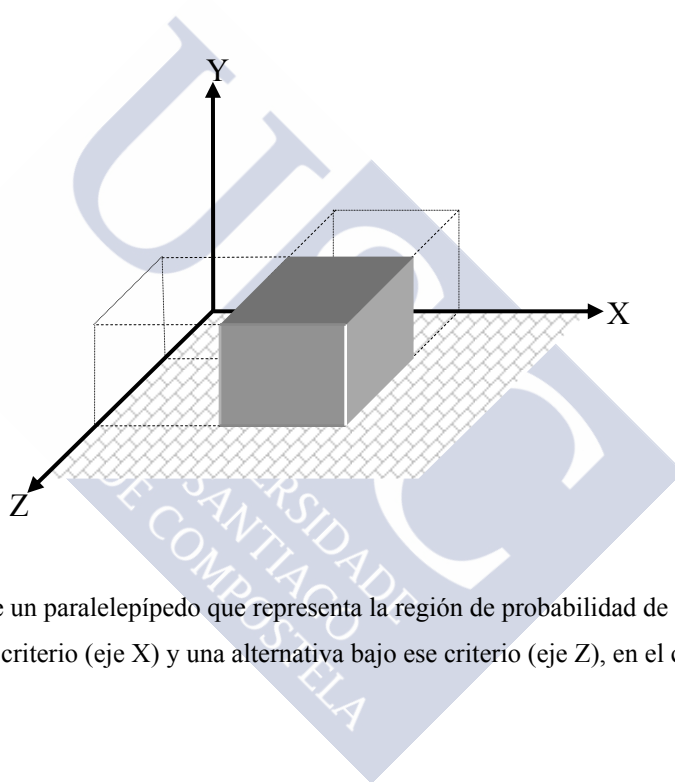
A partir de los datos disponibles en los vectores de opinión existen diferentes alternativas para establecer las dimensiones, la forma y la situación en unos ejes de las superficies de opinión. Además, tampoco es fácil establecer la distribución de probabilidad de los puntos que componen la superficie de opinión como resultado del proceso de emisión de juicios. Por todo ello, a continuación se van a proponer, analizar y comparar varias hipótesis para el establecimiento de las superficies de opinión y de sus correspondientes regiones de probabilidad tridimensionales.

### 5.3.4.1 Hipótesis I

La primera de las hipótesis estudiadas es la siguiente:

**Hipótesis I:** *Todos los puntos que se enmarcan dentro de la superficie de opinión poseen una probabilidad de suceso constante e igual a 1.*

Asumir la *Hipótesis I* conlleva el establecimiento de las superficies de opinión como rectángulos en los que cualquier punto tiene la misma probabilidad de suceso (probabilidad constante de opinión), y por tanto las regiones de probabilidad de las opiniones son paralelepípedos (Fig. 5.9).



**Figura 5.9:** Ejemplo de un paralelepípedo que representa la región de probabilidad de las opiniones de un decisor con respecto a un criterio (eje X) y una alternativa bajo ese criterio (eje Z), en el caso de la *Hipótesis I*.

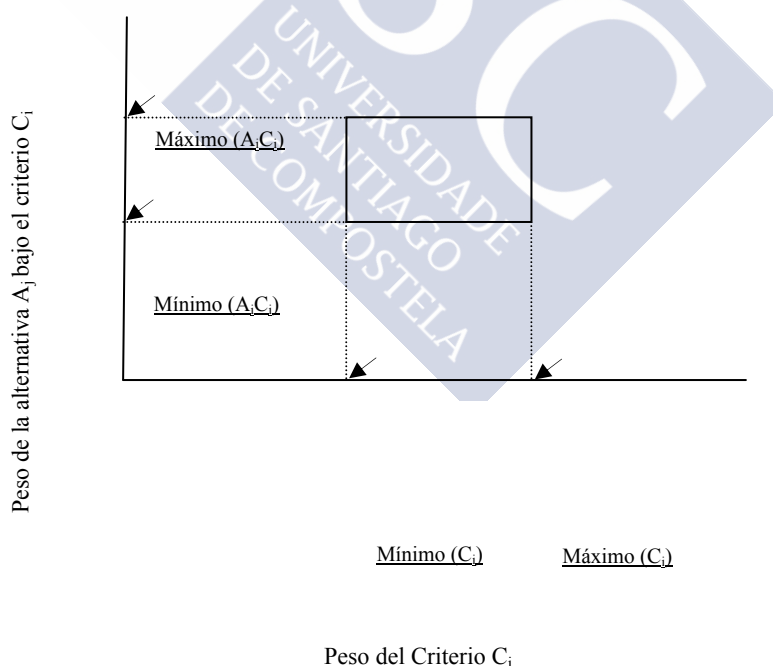
En este caso, el primer paso para construir el paralelepípedo que representa la región de probabilidad es establecer el rango de las opiniones según los datos que se recogen en el vector de opinión, y para ello se construyen los rectángulos en los que en el eje X se proyectan los rangos de opiniones de un criterio  $C_i$  y en el eje Z los rangos de una alternativa  $A_j$  bajo la influencia de  $C_i$ . En el eje Y, formando las proyecciones XY y ZY, se exponen las distribuciones de probabilidad de las opiniones del criterio  $C_i$  y de la alternativa  $A_j$  bajo la influencia del criterio  $C_i$  respectivamente.

En cualquier caso, si se asume la *Hipótesis I* existe cierta incertidumbre (distintas posibilidades) a la hora de establecer los límites superior e inferior de los intervalos correspondientes a las opiniones de los criterios y de alternativas bajo ese criterio (es decir, la superficie de opinión), debido al desconocimiento de la verdadera distribución de su probabilidad dentro del vector de opinión. Para tratar de solucionar este problema se van a analizar tres sub-hipótesis, en las que se van a establecer diferentes formas de cálculo del rango de los intervalos, aunque dentro de ellas se asuma en todos los casos que la probabilidad de suceso sea constante, tal como indica la *Hipótesis I*.

La primera de las tres sub-hipótesis es la siguiente:

**Hipótesis Ia:** *Los límites superior e inferior del rango de opinión se corresponden respectivamente al máximo y mínimo de los valores obtenidos en el vector de resultados.*

En este caso se acota la superficie de opinión de un decisor suponiendo que el valor del juicio se enmarca entre intervalos formados por el mínimo y el máximo de los valores obtenidos en la evaluación de los triángulos, tal y como se expone en la Figura 5.10.



**Figura 5.10:** Delimitación del rectángulo mediante el valor máximo y mínimo de los vectores resultado de un criterio dado y una alternativa bajo la influencia de ese criterio (*Hipótesis Ia*).

Otra posibilidad para delimitar el rectángulo de opinión es asumir la segunda sub-hipótesis:

**Hipótesis Ib:** *Los límites superior e inferior del rango de opinión se corresponden a los determinados por una distribución t aplicada a los valores obtenidos en el vector de resultados.*

En esta hipótesis es necesario calcular los intervalos de confianza con un nivel de significación de  $(1-\alpha)$  %. Para ello, primero se calcula el valor medio de los pesos para un criterio dado  $i$ , y con ello la relatividad para el establecimiento de una jerarquía, mediante la media aritmética de los valores que componen el vector  $\bar{C}_i$  (Ecuación 5.7) y la desviación estándar de los seis elementos del vector ( $\sigma_{c_i}$ , Ecuación 5.8), para el ejemplo seguido con ocho criterios:

$$\bar{C}_i = \left( \frac{VC_{i,i-2} + VC_{i,i+1} + VC'_{i,i+1} + (\delta - VC_{i-1,i}) + (\delta - VC'_{i-1,i}) + (\delta - VC_{i+2,i})}{6} \right) \quad [\text{Ec. 5.7}]$$

$$\sigma_{c_i} = \text{Desvest}(VC_{i,i-2}, VC_{i,i+1}, VC'_{i,i+1}, (\delta - VC_{i-1,i}), (\delta - VC'_{i-1,i}), (\delta - VC_{i+2,i})) \quad [\text{Ec. 5.8}]$$

repetiéndose el cálculo para cada uno de los  $n$  criterios que entraron en el proceso de decisión, esto es  $\forall C \in (C_1, C_2, C_3, \dots, C_n)$ .

A la hora de extraer intervalos de confianza al  $(1-\alpha)$  % para un número  $m$  de alternativas se opera de la misma manera, es decir primero se obtiene el valor medio del peso de la alternativa para un criterio dado (Ecuación 5.9) y su correspondiente desviación estándar (Ecuación 5.10):

$$\bar{AC}_i = \left( \frac{VAC_{i,k,k-2} + VAC_{i,k,k+1} + VAC'_{i,k,k+1} + (\delta - VAC_{i,k-1,k}) + (\delta - VAC'_{i,k-1,k}) + (\delta - VAC_{i,k+2,k})}{6} \right) \quad [\text{Ec. 5.9}]$$

$$\sigma_{A_{C_i}} = \text{Desves}(VAC_{i,k,k-2} + VAC_{i,k,k+1} + VAC'_{i,k,k+1} + (\delta - VAC_{i,k-1,k}) + (\delta - VAC'_{i,k-1,k}) + (\delta - VAC_{i,k+2,k})) \quad [\text{Ec. 5.10}]$$

Repitiéndose los cálculos para cada una de las alternativas bajo cada criterio que se hayan tenido en cuenta en la decisión, esto es  $\forall AC_i \in (A_1, A_2, A_3, \dots, A_m)$ .

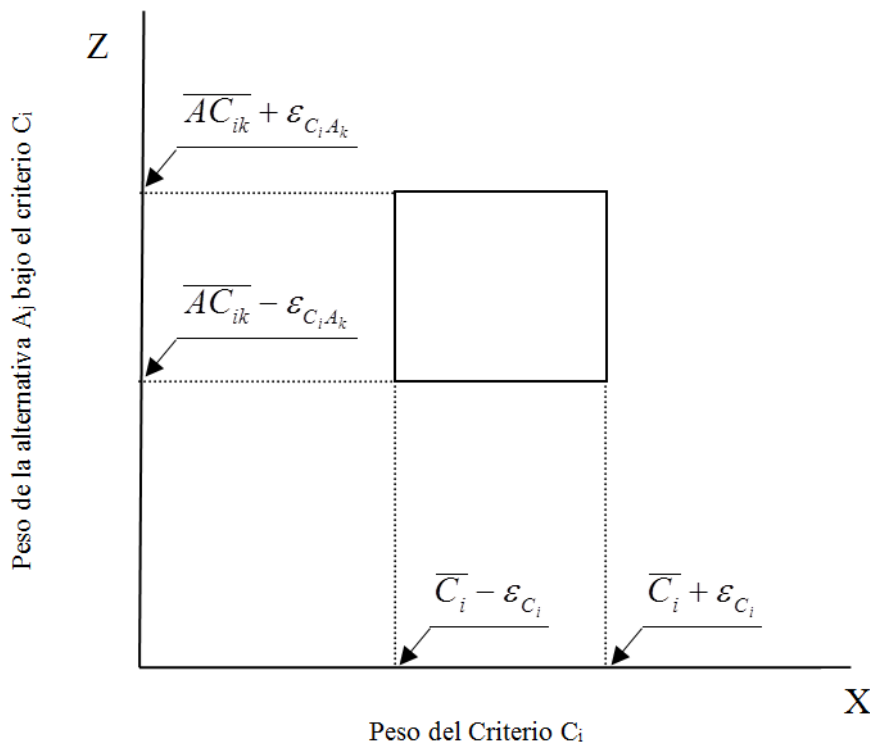
El último paso es confeccionar y acotar la superficie de opinión en la que, bajo una probabilidad especificada, se mueve el peso de los criterios y de las alternativas conjuntamente. Para ello se crean intervalos de confianza para los criterios (Ecuación 5.11):

$$[\bar{C}_i - \varepsilon_{C_i}, \bar{C}_i + \varepsilon_{C_i}], \text{ siendo } \varepsilon_{C_i} = t_{\left(1-\frac{\alpha}{2}\right)} \left( \frac{\sigma_{C_i}}{\sqrt{n}} \right) \quad [\text{Ec. 5.11}]$$

y para las alternativas bajo cada criterio (Ecuación 5.12):

$$[\overline{AC}_{ik} - \varepsilon_{C_i A_k}, \overline{AC}_{ik} + \varepsilon_{C_i A_k}], \text{ siendo } \varepsilon_{C_i A_k} = t_{\left(1-\frac{\alpha}{2}\right)} \left( \frac{\sigma_{A_k C_i}}{\sqrt{m}} \right) \quad [\text{Ec. 5.12}]$$

tal como se muestra en la Figura 5.11.



**Figura 5.11:** Acotación del rectángulo de opinión a partir de los intervalos de confianza bajo una distribución t (Hipótesis Ib).

Finalmente, la tercera opción para delimitar el rectángulo o superficie de opinión es asumir la última de las sub-hipótesis:

**Hipótesis Ic:** *Los límites superior e inferior del rango de opinión se corresponden a los determinados por una distribución normal aplicada a valores obtenidos en el vector de opinión.*

En esta sub-hipótesis los límites de los intervalos se construyen de manera similar a lo comentado en la anterior, pero bajo una distribución Normal, esto es, para la creación del intervalo de confianza de los criterios  $[\bar{C}_i - \varepsilon_{C_i}, \bar{C}_i + \varepsilon_{C_i}]$  donde  $\varepsilon_{C_i} = N_{\left(1-\frac{\alpha}{2}\right)}\left(\frac{\sigma_{C_i}}{\sqrt{n}}\right)$ , y la creación de los intervalos de confianza para la opinión de las alternativas bajo un criterio dado:  $[\overline{AC}_{i_k} - \varepsilon_{C_i A_k}, \overline{AC}_{i_k} + \varepsilon_{C_i A_k}]$  donde  $\varepsilon_{C_i A_k} = N_{\left(1-\frac{\alpha}{2}\right)}\left(\frac{\sigma_{A_k C_i}}{\sqrt{m}}\right)$ .

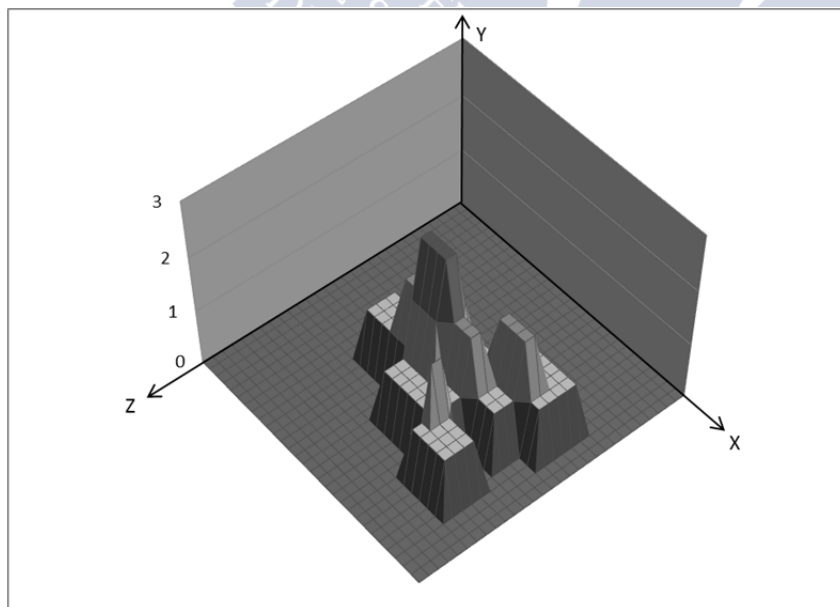
A priori ninguna de estas tres sub-hipótesis se puede considerar mejor que las otras, por lo que en un apartado posterior (5.3.4.4) se procederá a su comparación.

Por otra parte, e independientemente de la sub-hipótesis que se asuma, si se realizan  $N$  repeticiones de un mismo decisor o de varios decisores, las probabilidades según la *Hipótesis I* serían el resultado de sumar aritméticamente las correspondientes a las superficies solapadas o en común (que suponen un consenso). De esa manera, las zonas de mayor probabilidad de suceso serían aquellas en la que se produzca un mayor solapamiento o consenso entre los rectángulos de opinión de las diferentes decisiones, que corresponderían a la suma aritmética de campos binarios (0,1), como se puede observar en la Figura 5.12.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

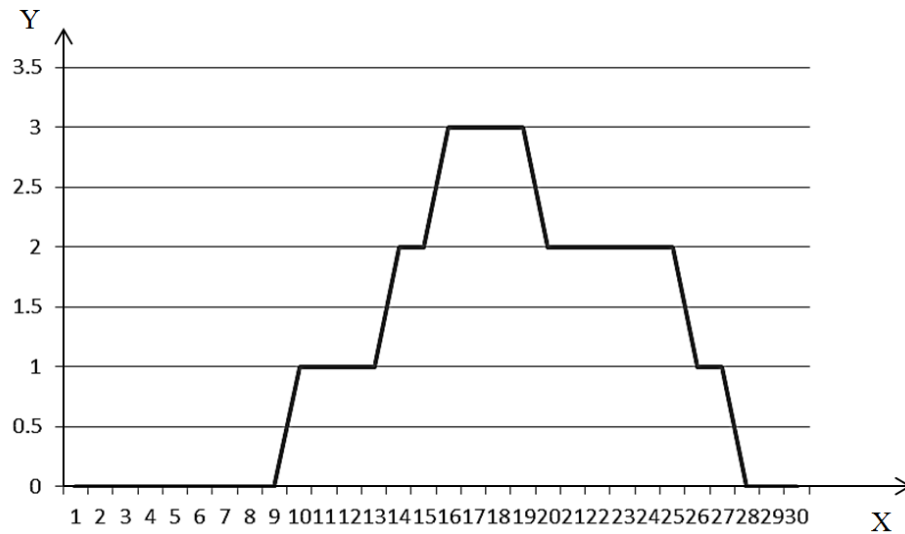
**Figura 5.12:** solapamiento de rectángulos de opinión de un criterio y una alternativa mediante campos binarios sumados aritméticamente.

Estos solapamientos entre repeticiones dan, bajo la *Hipótesis I*, unas distribuciones de probabilidad que en tres dimensiones tienen una apariencia como se muestra, a modo de ejemplo, en la Figura 5.13.



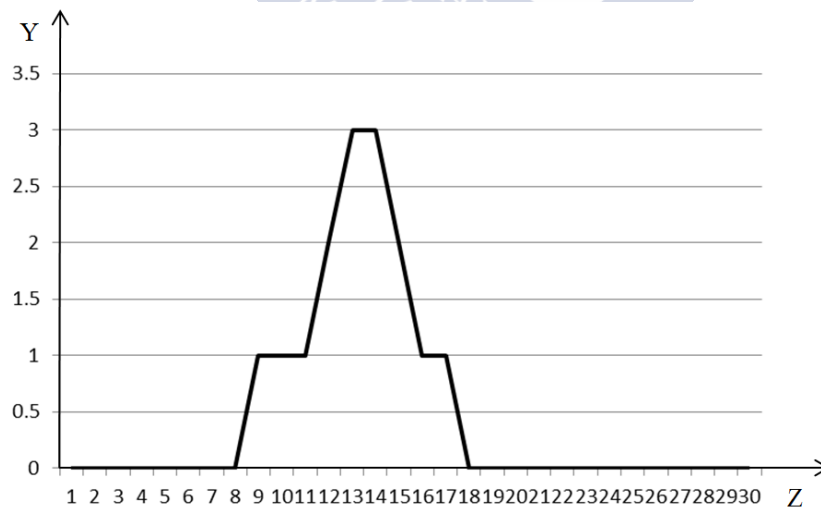
**Figura 5.13:** Ejemplo de una función de probabilidades del peso de un criterio y una alternativa en el caso de  $N$  repeticiones (de una misma persona o de diferentes decisores) bajo la *Hipótesis I*.

En este caso se puede obtener la representación de la función de probabilidad del peso de un criterio evaluado, según los solapamientos efectuados, considerando su proyección sobre los ejes X e Y (Figura 5.14).



**Figura 5.14:** Ejemplo de una función de la probabilidad del peso de un criterio en el caso de  $N$  repeticiones (de una misma persona o de diferentes decisores) bajo la *Hipótesis I*.

Si aleatoriamente se elige un peso del criterio bajo la probabilidad obtenida (un punto en el eje X), perpendicularmente a la opinión de los criterios se obtiene la distribución de la probabilidad del peso de la alternativa bajo ese criterio, considerando en este caso su proyección sobre los ejes Y e Z, tal y como se muestra en la Figura 5.15.



**Figura 5.15:** Ejemplo de una función de probabilidad del peso de una alternativa en función del peso del criterio seleccionado (en este caso para un peso de criterio igual a 18), en el caso de  $N$  repeticiones (de una misma persona o de diferentes decisores) bajo la *Hipótesis I*.

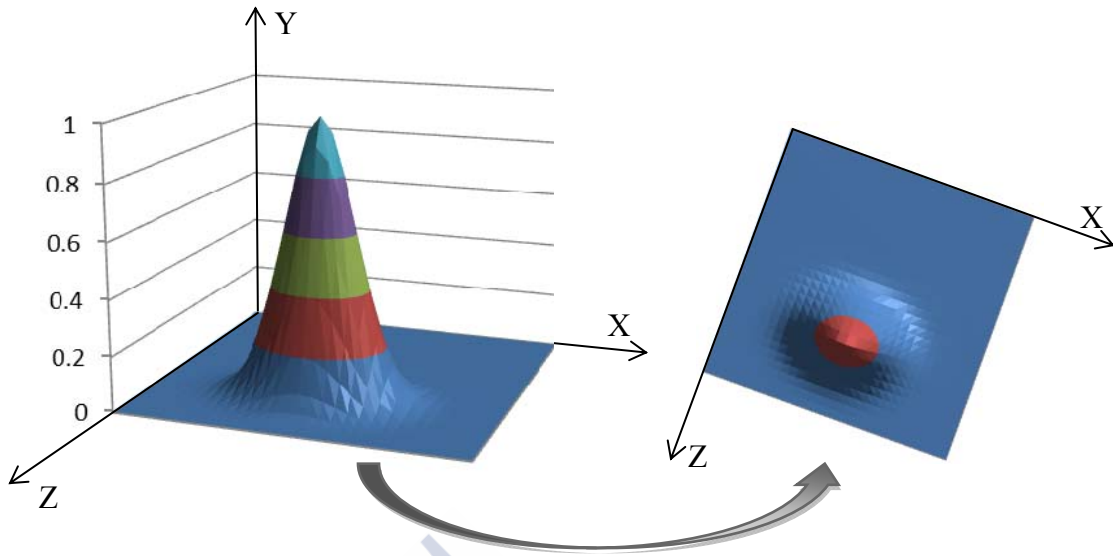
La ventaja de la *Hipótesis I* es que, debido al desconocimiento de cómo se distribuye la probabilidad dentro de un rectángulo de opinión, es lógico y sencillo asumir que como media todos los puntos tienen la misma probabilidad. Por el contrario, la *Hipótesis I* presenta el problema de dar un valor excesivo a los solapamientos (al sumarse en los mismos las probabilidades, todas iguales a 1, de cada rectángulo) frente a la opinión unipersonal de cada individuo, lo cual no siempre es conveniente, ya que el solapamiento de opiniones podría suceder en partes de los rectángulos en los que se no se encontrara la mayor probabilidad de cada decisor individualmente, y entonces se estaría produciendo una evidente sobrestimación.

#### **5.3.4.2 Hipótesis II**

La segunda de las hipótesis consideradas para establecer la forma y dimensiones de las regiones de probabilidad de las opiniones es la siguiente:

**Hipótesis II:** *todos los puntos que se enmarcan dentro de la superficie de opinión poseen una probabilidad de suceso según una distribución normal bivariante, caracterizada por una media y una desviación estándar de cada una de las dos variables.*

Asumir la *Hipótesis II* significa que las regiones de probabilidad de las opiniones tienen la forma de paraboloides elípticos, como resultado de la intersección de las dos distribuciones normales consideradas, una para el criterio (en el eje X) y la otra para la alternativa (en el eje Z), por lo que las superficies de opinión (proyección sobre los ejes X y Z) serán elipses, como se muestra en la Figura 5.16. Sólo en el caso de que las dos distribuciones normales fuesen exactamente iguales la región de probabilidad sería un paraboloide de revolución, cuyas secciones (proyecciones sobre los ejes X y Z) corresponderían a círculos.



**Figura 5.16:** Ejemplo de una elipse, que representa la superficie de opinión, y del correspondiente paraboloides elíptico que representa la región de probabilidad de las opiniones de un decisor con respecto a un criterio (eje X) y una alternativa bajo ese criterio (eje Z), en el caso de la *Hipótesis II*.

Dentro de la *Hipótesis II* se pueden considerar dos posibilidades o sub-hipótesis, ya que las distribuciones bivariantes se pueden establecer bajo variables dependientes o independientes.

Por tanto, la primera sub-hipótesis es la siguiente:

**Hipótesis IIa:** *El peso de los criterios y el peso de las alternativas son independientes.*

En el MTC<sup>®</sup> la evaluación de criterios se realiza independientemente de la evaluación de alternativas bajo cada criterio, por lo que no existe relación de dependencia entre una calificación y la otra, y entonces la covarianza entre las dos variables es igual a cero. En este caso la función de densidad de probabilidad viene dada por la siguiente ecuación:

$$f(x_1, x_2) = \exp \left[ -\frac{1}{2} \left[ \left( \frac{x_1 - \mu_1}{\sqrt{\sigma_1}} \right)^2 + \left( \frac{x_2 - \mu_2}{\sqrt{\sigma_2}} \right)^2 \right] \right] \quad [\text{Ec. 5.13}]$$

siendo  $\mu$  la media y  $\sigma$  la desviación estándar de cada variable.

La otra posibilidad para delimitar el rectángulo de opinión según la *Hipótesis II* es asumir la segunda sub-hipótesis:

**Hipótesis IIb:** *el peso de los criterios y el peso de las alternativas son dependientes.*

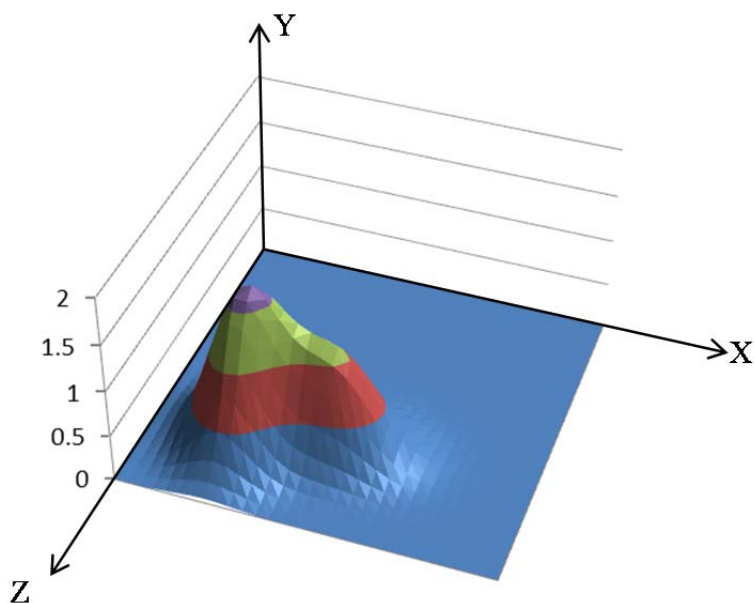
En este caso, y aunque en el MTC<sup>©</sup> la evaluación de criterios se realiza independientemente de la evaluación de alternativas bajo cada criterio, se asume que pueden aparecer relaciones de dependencia entre las dos evaluaciones, por lo que en el análisis bivalente ha de tenerse en cuenta la covarianza entre ambas. Por tanto, en este caso la función de probabilidad viene dada por:

$$f(x_1, x_2) = \exp \left[ -\frac{1}{2(1-\rho_{12}^2)} \left[ \left( \frac{x_1 - \mu_1}{\sqrt{\sigma_1}} \right)^2 + \left( \frac{x_2 - \mu_2}{\sqrt{\sigma_2}} \right)^2 - 2\rho_{12} \left( \frac{x_1 - \mu_1}{\sqrt{\sigma_1}} \right) \left( \frac{x_2 - \mu_2}{\sqrt{\sigma_2}} \right) \right] \right] \quad [\text{Ec. 5.14}]$$

siendo  $\mu$  la media y  $\sigma$  la desviación estándar de cada variable, y  $\rho$  la covarianza existente entre las dos variables.

Comparando estas dos sub-hipótesis parece razonable, y así se ha hecho en este trabajo, la elección de la primera, pues la evaluación de criterios en el MTC<sup>©</sup> se produce de manera independiente a la de alternativas (pudiendo hacerse una antes que otra, indiferentemente, y en distintos momentos), por lo que normalmente no habrá relación o dependencia entre ambas.

Por otra parte, e independientemente de la sub-hipótesis que se haya asumido, si se realizan  $N$  repeticiones de un mismo decisor o de varios decisores las probabilidades según la *Hipótesis II* serán el resultado de sumar aritméticamente las correspondientes a las superficies solapadas o en común (que suponen un consenso). Por tanto, las zonas de mayor probabilidad de suceso serán aquellas en la que se produzca un mayor solapamiento o consenso entre las elipses de opinión de las diferentes decisiones, como se puede observar en la Figura 5.17, aunque en este caso el valor que se suma de cada elipse no será siempre el mismo (a diferencia de lo que ocurría con los rectángulos en la *Hipótesis I*).



**Figura 5.17:** Ejemplo de una distribución de probabilidades del peso de un criterio y una alternativa, en el caso de  $N$  repeticiones (de una misma persona o de diferentes decisores), aplicando una función bivalente independiente (*Hipótesis IIa*).

Como conclusión se puede decir que las principales ventajas de la *Hipótesis II* consisten en no aceptar que todos los puntos de la región de opinión tienen la misma probabilidad, y que cuando hay varias decisiones se gradúa el valor  $y$ , y, por tanto, la importancia de los solapamientos o consensos en función de si se producen en zonas de alta o baja probabilidad dentro de las superficies de opinión elípticas, evitándose así las posibles sobrestimaciones que se pueden producir con la *Hipótesis I*. Sin embargo, el inconveniente de la *Hipótesis II* radica en el hecho de asumir que la probabilidad de la opinión sobre los criterios y alternativas sigue una distribución normal bivalente, cuando el escaso número de datos de los vectores de opinión no permite conocer con certeza la distribución real.

### 5.3.4.3 Hipótesis III

De la conjunción de las dos hipótesis consideradas anteriormente para establecer las regiones de probabilidad de las opiniones surge una posible tercera, que se denominará *Hipótesis III* o

*híbrida*, pues contiene características de una y otra, en un intento de aunar sus ventajas y de minimizar sus inconvenientes.

Esa tercera hipótesis es la siguiente:

**Hipótesis III o híbrida:** *todos los puntos que se enmarcan dentro de la superficie de opinión poseen una probabilidad de suceso que se calcula como intersección (producto) de la Hipótesis I con la Hipótesis II.*

Bajo esta hipótesis las regiones de probabilidad se construyen multiplicando directamente las probabilidades de la función de densidad de la *Hipótesis I* con las de la *Hipótesis II*. La forma de la región de probabilidad de las opiniones será, en este caso, la de una figura inclasificable, resultado de la intersección entre un paralelepípedo y un paraboloides elíptico, mientras que las superficies de opinión corresponderán a la intersección entre un rectángulo y una elipse.

Al resultar una combinación de las anteriores, en esta *Hipótesis III* se pueden plantear las mismas sub-hipótesis expuestas para la *I* respecto a la creación de las superficies de opinión, mientras que respecto a las sub-hipótesis planteadas para la *II* ya se ha comentado que se asume, dentro de una distribución bivalente, la independencia entre las evaluaciones de los criterios y de las alternativas, y por tanto se acepta la *sub-hipótesis IIa*.

En definitiva, para la *Hipótesis III o híbrida* se tienen las siguientes posibles combinaciones:

**Sub-hipótesis IIIa:** *Bivalente*  $\cap$  *Hipótesis Ia*.

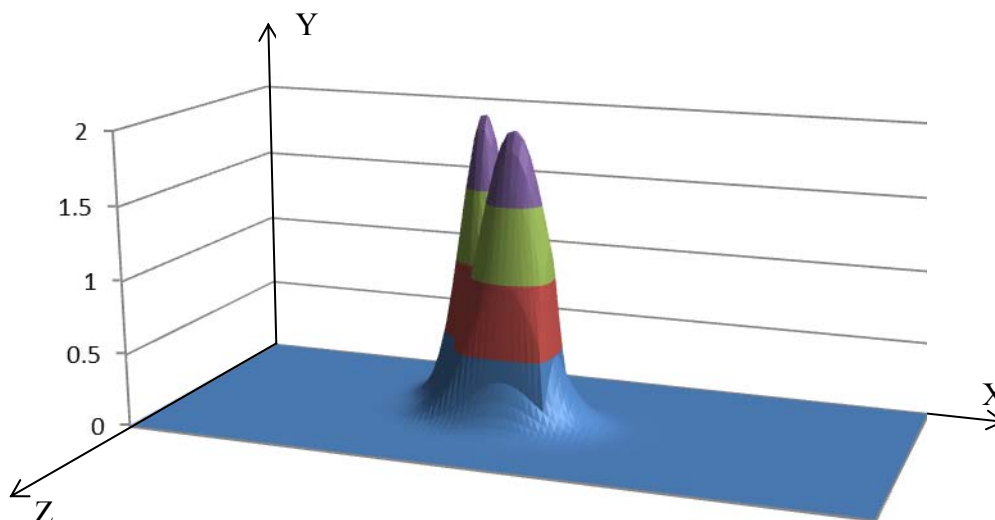
**Sub-hipótesis IIIb:** *Bivalente*  $\cap$  *Hipótesis Ib*.

**Sub-hipótesis IIIc:** *Bivalente*  $\cap$  *Hipótesis Ic*.

A priori ninguna de estas tres sub-hipótesis se puede considerar mejor que las otras, por lo que en el siguiente apartado (5.3.4.4) se procederá a su comparación.

Por otra parte, e independientemente de la sub-hipótesis que se asuma, cuando existan  $N$  repeticiones de un mismo decisor o de varios decisores, las probabilidades según la *Hipótesis III* serán, igual que en los casos anteriores, el resultado de sumar aritméticamente las correspondientes a las superficies solapadas o en común (que suponen un consenso). De esa

manera, las zonas de mayor probabilidad de suceso serán aquellas en las que se produzca un mayor solapamiento o consenso entre los rectángulos de opinión de las diferentes decisiones, como se puede observar en la Figura 5.18.



**Figura 5.18:** Ejemplo de una distribución de probabilidades del peso de un criterio y una alternativa, en el caso de  $N$  repeticiones (de una misma persona o de diferentes decisores), aplicando la *Hipótesis III o híbrida*.

El mayor inconveniente que se puede achacar a la *Hipótesis III* es su complejidad de cálculo.

#### 5.3.4.4 Comparación entre hipótesis

A la hora de evaluar y comparar las hipótesis se va a proceder a realizar unas simulaciones para la obtención de los resultados o jerarquía de las alternativas. Estas simulaciones se basan en un número de iteraciones en las que mediante la generación de aleatorios se extrae un peso de los criterios y alternativas bajo cada criterio, y se retroalimenta con la parte analítica del AHP.

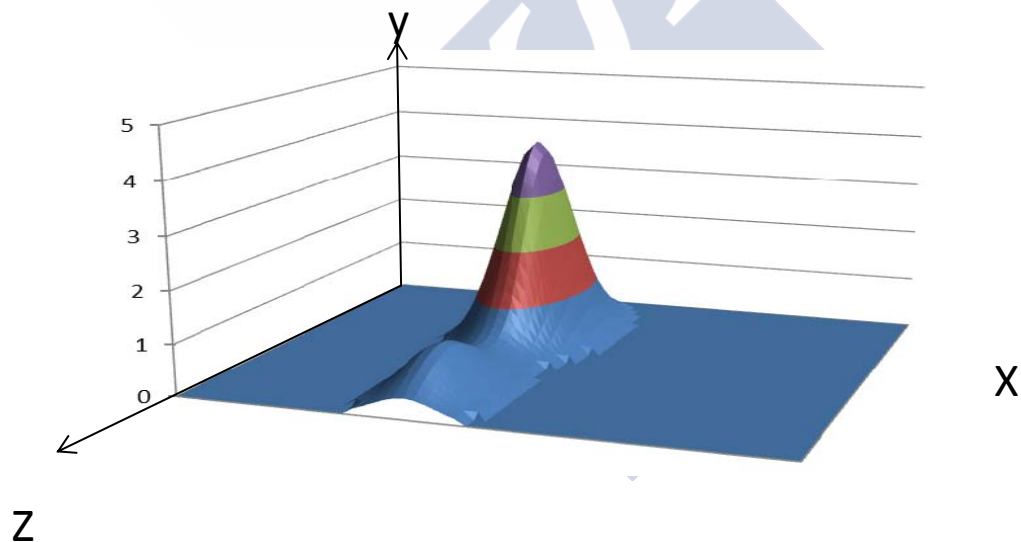
##### 5.3.4.4.1 Generación de aleatorios bajo una distribución dada

En los apartados anteriores se han expuesto diferentes hipótesis como alternativas para establecer regiones en las que se enmarca un peso, lo que dificulta el análisis matemático global de la decisión. La resolución de una decisión pasa a ser un problema heurístico, en el que aleatoriamente se extraerán opiniones de criterios y alternativas bajo la probabilidad de la

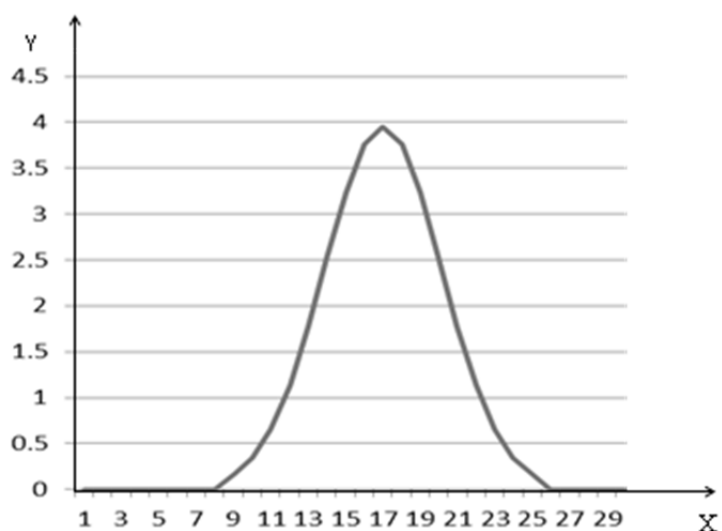
distribución establecida según la hipótesis que se desee. La utilización de aleatorios supone que se puede generar un número infinito de soluciones satisfactorias, por lo que se debe acotar su número, de manera que se pueda evaluar cuál es la mejor mediante la aplicación de inferencia estadística.

Para la generación de aleatorios bajo una distribución dada (o región de probabilidad de las opiniones) se utilizan, en este caso, los valores discretos de los pesos de los criterios (eje X) asociados a la probabilidad de suceso (en el eje Y), generando un aleatorio entre la mínima probabilidad de suceso y la máxima probabilidad acumulada. El resultado de la generación de aleatorios es la obtención del peso de un criterio y de una alternativa, por lo que se debe generar un aleatorio para cada criterio y para cada alternativa.

Como ejemplo, suponiendo una región de probabilidad de las opiniones como la que se muestra en la Figura 5.19, proyectándola sobre el plano XY se obtiene la distribución de probabilidad del peso de ese criterio según uno o varios decisores (Figura 5.20).

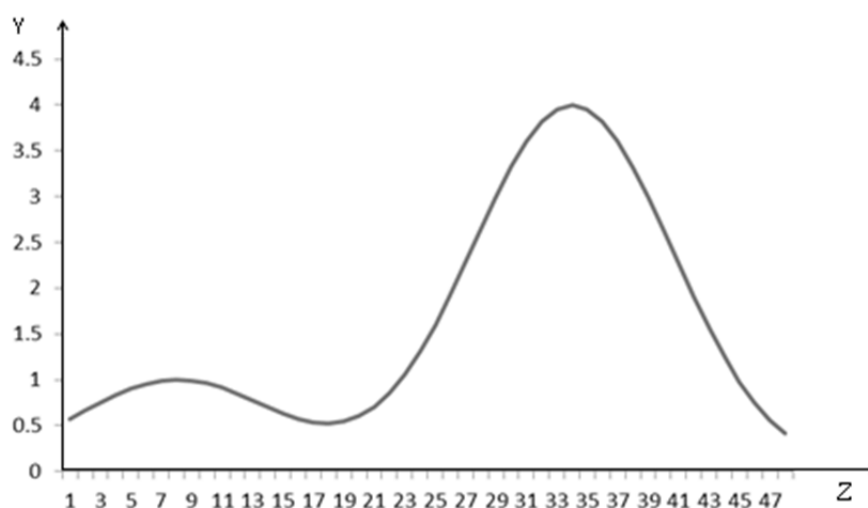


**Figura 5.19:** Ejemplo de región de probabilidad de las opiniones.



**Figura 5.20:** Proyección al eje XY de la región de probabilidad de las opiniones de la Figura 5.19 para un valor aleatorio de la alternativa.

Por otra parte, si aleatoriamente se elige un peso de un criterio en base a la probabilidad obtenida (Figura 5.20) y se proyecta al plano YZ, se obtiene la distribución del peso de esa alternativa bajo la influencia de ese criterio, tal como se muestra en la Figura 5.21. Si aleatoriamente se escoge un peso en base a esa distribución, se obtiene el peso de esa alternativa.



**Figura 5.21:** proyección al eje YZ de la región de probabilidad de las opiniones de la Figura 5.19 para un valor aleatorio del criterio.

### 5.3.4.4.2 Simulación de conjuntos de opiniones en busca de un objetivo

Analíticamente, una decisión se resume en un conjunto de rangos de opiniones, existiendo infinitas posibilidades que desembocan en resultados diferentes. Una sola iteración muestra un resultado satisfactorio, posible y viable, pero sin embargo, en un contexto heurístico es necesario llevar a cabo un número representativo de iteraciones con el fin de poder llegar al resultado que satisfaga el objetivo buscado.

Cuando se extraen de forma aleatoria todos los pesos de los criterios y de las alternativas bajo cada criterio, se obtienen suficientes datos para complementar la matriz de comparaciones pareadas propuesta por Saaty (ver apartado 3.2). De esa manera, se puede realizar un análisis global de dichos resultados idéntico al que se realiza en el método AHP, que consiste en una multiplicación matricial entre pesos de alternativas y criterios para obtener el resultado o jerarquía de las alternativas.

El proceso se debe repetir un número de veces suficiente para que el resultado se muestre robusto o poco variable. Para ello es preciso contar con un elevado número de diferentes resultados, que puedan ser analizados mediante procedimientos estadísticos o conteos (como por ejemplo, el número de veces que una alternativa sale elegida) para llegar a un resultado justificado.

### 5.3.4.4.3 Comparación

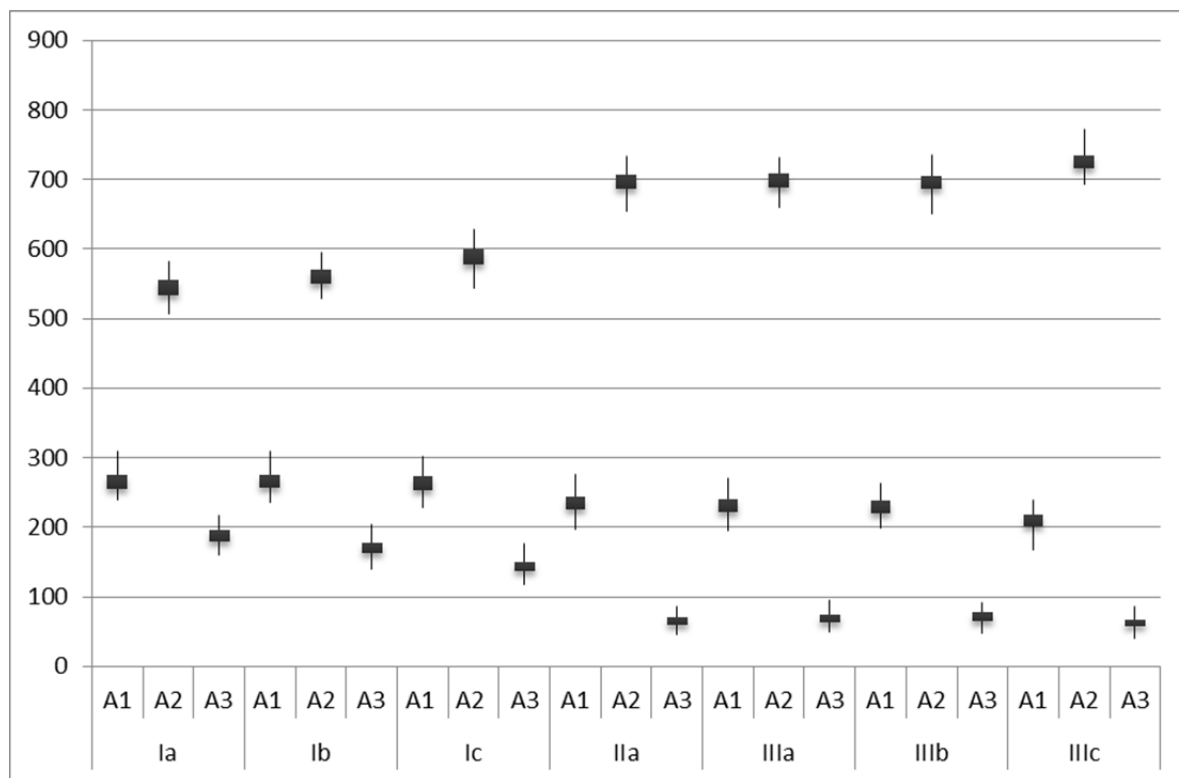
Con el objeto de comparar las hipótesis planteadas en los apartados anteriores para la generación de las regiones de probabilidad de las opiniones, se han aplicado las mismas a un caso práctico de decisión multicriterio bajo la metodología MTC<sup>©</sup>. Para ello se ha desarrollado una decisión que tiene como objetivo la elección de un vehículo todo terreno para movilidad de cuadrillas de una empresa forestal, entre tres posibles alternativas: Alternativa 1 (A1): Nissan Pathfinder 2.5 TDi ([www.nissan.es](http://www.nissan.es)); Alternativa 2 (A2): Land Rover Defender 2.2 TDi ([www.landrover.com/es](http://www.landrover.com/es)); y Alternativa 3 (A3): Suzuki Gran Vitara 1.9L DDiS ([www.suzuki.es](http://www.suzuki.es)). Dichas alternativas se han evaluado bajo el siguiente esquema de criterios:

- *Criterios Económicos:*
  - *Consumo medio de combustible.*

- *Coste de mantenimiento oficial.*
- *Coste de ruedas.*
- *Precio de compra.*
- *Prestigio de la marca:*
  - *Garantía.*
  - *Fiabilidad.*
  - *Disponibilidad de recambios.*
  - *Marca.*
- *Criterios técnicos:*
  - *Potencia.*
  - *Aceleración.*
  - *Peso.*
  - *Dispositivos de seguridad.*
- *Dimensiones:*
  - *Largo.*
  - *Capacidad de maletero.*
  - *Ancho.*
  - *Alto.*

A partir de los valores de evaluación obtenidos en los triángulos de una calificación, se han realizado 200 simulaciones de 1.000 iteraciones para cada hipótesis, recogándose el número de veces que salía ganadora cada alternativa. Este número arbitrario de iteraciones se ha elegido para tener información suficientemente representativa para realizar una discusión realista de cada hipótesis. Además, el hecho de repetir cada simulación 200 veces ha servido para extraer la variabilidad entre simulaciones y así poder compararlas.

El resultado de todas las simulaciones se muestra en la Figura 5.22, en la que se indica en el eje Y el número de veces que una alternativa ha resultado ganadora en las 1.000 iteraciones o repeticiones.



**Figura 5.22:** Resultados obtenidos (máximo, mínimo, percentil 25 y percentil 75) en 1.000 repeticiones de las simulaciones de todas las hipótesis consideradas aplicando la metodología MTC<sup>©</sup>.

En esa Figura se puede observar que en todas las hipótesis consideradas se ha obtenido el mismo resultado o jerarquía de las alternativas, esto es, en todos los casos la alternativa A2 ha resultado la ganadora en mayor número de ocasiones, a continuación la A1 y en último lugar la A3, lo cual es muy conveniente a la hora de decantarse por una u otra hipótesis. También se observa que las tres *sub-hipótesis I* han dado lugar a unos resultados muy similares y que, en comparación con el resto, han mostrado unas diferencias menos acusadas (de entre un 10 y un 20%) entre el número de veces que ha resultado elegida cada alternativa (es decir, las alternativas A1 y A3 han salido más veces ganadoras, frente a la A2, en las tres *sub-hipótesis I*). Por otra parte, los resultados de la *hipótesis IIa* han sido muy parecidos a los obtenidos por las *sub-hipótesis III*, y únicamente se observa una pequeña diferencia en el caso de la *sub-hipótesis IIIc*, que ha producido el mayor distanciamiento entre la alternativa seleccionada (A2) y las restantes.

A la vista de estos resultados, teniendo en cuenta que la jerarquía de las alternativas no ha cambiado al aplicar las diferentes hipótesis, que las diferencias entre alternativas han sido más

acusadas en la *hipótesis IIa* y las *sub-hipótesis III*, y que el proceso de cálculo matemático es mucho más complejo en las *sub-hipótesis III (híbridas)*, se ha seleccionado la *hipótesis IIa* como la más conveniente para la construcción de las regiones de probabilidad de las opiniones en la metodología MTC<sup>®</sup>. En definitiva, se va a asumir que: *Todos los puntos que se enmarcan dentro de la superficie de opinión poseen una probabilidad de suceso según una distribución normal bivariante, caracterizada por una media y una desviación estándar de cada una de las dos variables + El peso de los criterios y el peso de las alternativas son independientes.*

#### 5.4 Síntesis: Ventajas de la metodología MTC<sup>®</sup>

La metodología MTC<sup>®</sup> de apoyo a la toma de decisiones que se presenta en esta tesis, basada en la comparación por tríos en vez de por pares, posee las siguientes ventajas frente al clásico método AHP:

- Captura de juicios consistentes, que cumplen el axioma de *transitividad*, evitando los inconvenientes del común incumplimiento del axioma de *juicios recíprocos* en el AHP.
- Los triángulos incrementan la concentración de la persona que debe tomar la decisión, disminuyendo la influencia del ambiente y minimizando el sesgo cognoscitivo que se pueda producir en el proceso repetitivo de la decisión.
- Eliminación de escalas y valores discretos en la emisión de juicios. Los triángulos del MTC<sup>®</sup> suponen una superficie continua que aúna todas las posibles evaluaciones, y sólo se marcan tendencias graduadas con líneas y círculos que acotan los límites y magnitudes de selección entre los vértices, que ayudan a que el decisor emita su juicio conjunto de los tres criterios a la vez, especialmente en el caso de juicios difíciles de cuantificar.
- El número de decisiones a tomar por tríos en el MTC<sup>®</sup> es considerablemente menor si se compara con las parejas que es preciso evaluar en el método AHP, especialmente cuando el número de criterios y alternativas es elevado. Por esa razón, una de las mayores limitaciones del método AHP es que el número de criterios o alternativas no puede ser muy grande, mientras que en el método MTC<sup>®</sup> se minimiza este problema.

- Es posible conocer la variación de los pesos de los criterios o de las alternativas si se cambia el contexto en el que se realiza la calificación (es decir, cambiando algún vértice del triángulo).
- Con el MTC<sup>©</sup> se pueden generar *superficies de opinión*, de forma elíptica, delimitadas por los rangos o intervalos obtenidos para cada criterio y alternativa; y también *regiones de probabilidad de las opiniones* de tres dimensiones, con forma de paraboloides elípticos, asignando a cada punto del interior de una superficie de opinión una probabilidad de suceso según una distribución normal bivariante. En sucesivas repeticiones las superficies de opinión y las regiones de probabilidad se pueden ir superponiendo, proporcionando así información de cómo afectan las repeticiones en el tiempo a la decisión, y en el caso de decisiones en grupo se puede valorar el grado de uniformidad existente en las mismas.





*Nada tan difícil como decidirse*

Napoleón



# Capítulo 6

---

## 6 APLICACIÓN PRÁCTICA Y COMPARACIÓN ENTRE METODOLOGÍAS

### 6.1 Introducción

Como se ha descrito en el capítulo 2, un análisis multicriterio es una metodología de apoyo en la toma de decisiones que ayuda a jerarquizar u ordenar un grupo de alternativas bajo unos criterios dados, teniendo que ser las alternativas una posible solución viable al problema propuesto.

En el capítulo 3 se ha descrito la metodología más importante en el campo del análisis multicriterio, el AHP, junto con sus ventajas y desventajas, y en el capítulo 4 se han incluido tres ejemplos de aplicación práctica. Posteriormente, en el capítulo 5 se ha presentado una nueva metodología multicriterio de ayuda a las decisiones basada en comparaciones por tríos, denominada MTC<sup>©</sup>, que intenta ampliar las posibilidades del método AHP y minimizar sus limitaciones, y que supone un cambio importante en la captura de juicios, en el análisis matemático y en la exposición de los resultados. En este capítulo se van a aplicar a un caso práctico forestal las metodologías AHP y MTC<sup>©</sup>, con el objetivo principal de poder compararlas.

Para llevar a cabo esa comparación entre metodologías es necesario evaluar factores objetivos (como el tiempo necesario para tomar la decisión o la variabilidad en los pesos). Esto es debido a que el mundo de las decisiones multicriterio se enmarca dentro de un contexto de mucha incertidumbre, por lo que sería más correcto utilizar el concepto de *satisfacción* en vez del de *optimización*, ya que resulta complicado asegurar que la elección de una alternativa sea la óptima, pues se desconoce cómo será el contexto futuro. Es decir, todas las alternativas introducidas en una decisión deben ser posibles soluciones viables y se ha de elegir la más satisfactoria, sin que por ello se pueda asegurar que sea la óptima. Entonces, si los dos métodos (AHP y MTC<sup>©</sup>) jerarquizan las alternativas, la elección del mejor supone una

decisión compleja, ya que se han de comparar las dos metodologías bajo ciertos criterios, y ese objetivo es el que se persigue en este capítulo.

En definitiva, y según lo mencionado anteriormente, se ha decidido comparar de manera objetiva ambas metodologías, para lo cual se han aplicado a una misma decisión compleja, dentro del campo forestal. Los criterios o factores objetivos de comparación han sido el tiempo invertido en la decisión, la variabilidad en las opiniones de un mismo decisor y la variabilidad entre decisores.

## 6.2 Diseño del experimento

Para llevar a cabo la comparación entre metodologías es importante que las condiciones contextuales en las que se tome la decisión no sean muy diferentes a las que cabría esperar en un entorno normal, que por lo general es un despacho de una empresa u organismo, o incluso el domicilio de cada decisor. Además, la decisión ha de ser compleja, esto es, que incluya muchos criterios y/o alternativas, y que tenga repercusión económica en la empresa u organismo en la que se tome. Por otra parte, se va a considerar la existencia de diferentes decisores, que incluso van a efectuar repeticiones de la decisión. Por esas razones, una vez establecidos el objetivo, los criterios y las alternativas, se ha elaborado un dossier con información clara y concisa acerca de los mismos, que se ha entregado a cada uno de los decisores, para evitar tener que dar explicaciones.

Una vez que los decisores han analizado la información acerca del caso práctico y han asimilado los criterios y las alternativas a evaluar, han aplicado las dos metodologías, eligiendo el orden según su preferencia, así como el número de repeticiones no consecutivas que han deseado realizar. Todas las decisiones se han tomado de manera independiente, no habiendo discusión/debate entre los decisores acerca de las decisiones adoptadas con el AHP y con el MTC<sup>©</sup>.

La decisión que se pretende tomar es muy similar a la expuesta en el apartado 4.3.1, en el que se seleccionaba diversa maquinaria de aprovechamiento forestal (apeo, derramado, tronzado y apilado) con el fin de proceder a su compra. En este caso se ha utilizado un esquema mucho más complejo de criterios, y se han añadido cuatro alternativas más, por lo que se ha contado

con un total de siete, número suficiente para definir esta decisión como de alta dificultad, por la combinatoria (número de parejas o tríos a evaluar) que subyace de ella.

Para llevar a cabo la toma de decisión según la metodología AHP se ha utilizado el programa MPC<sup>©</sup> 2.0 (Pérez-Rodríguez & Rojo-Alboreca 2011, 2012a), descrito en el apartado 4.3. Para aplicar la metodología MTC<sup>©</sup> se ha facilitado a los decisores un prototipo desarrollado específicamente para este caso en Microsoft<sup>©</sup> Excel 2010, complementado con formularios programados con Visual Basic para aplicaciones.

### 6.2.1 *Objetivo*

Se va a suponer que una empresa de tamaño pequeño/mediano situada en Galicia, cuya labor es el aprovechamiento de madera para su posterior venta en aserraderos, quiere decidir si debe seguir con la actual forma de aprovechamiento, que es una pareja de motoserristas, o si bien adquiere una máquina autopropulsada para efectuar esa labor.

### 6.2.2 *Criterios*

Como ya se ha comentado reiteradamente, uno de los puntos débiles de las metodologías de análisis multicriterio por comparaciones pareadas es que son muy sensibles al número de criterios, ya que las parejas se construyen bajo combinatoria. Por esa razón esta aplicación se ha diseñado con un suficientemente alto número de criterios (18 criterios, reunidos en cuatro grupos y, por tanto, en dos niveles), con la finalidad de evaluar su influencia en la viabilidad de las dos metodologías que se pretende comparar.

Los criterios que se proponen para la toma de esta decisión se engloban, entonces, en un esquema de dos niveles, agrupándose en criterios económicos, ambientales, sociales y técnicos. Dichos criterios han sido:

- *Criterios económicos:*
  - *Menor precio de compra.*
  - *Menor coste de mantenimiento.*
  - *Menor consumo de combustible.*
  - *Menor coste de desplazamientos.*
- *Criterios sociales:*

- *Menor rotura de infraestructuras.*
- *Menor necesidad de formación para uso.*
- *Mayor seguridad/estabilidad.*
- *Menor ruido.*
- *Mayor generación de empleos.*
- *Criterios ambientales:*
  - *Menor erosión.*
  - *Menor compactación del suelo.*
  - *Menor afección del estrato vegetal ajeno al aprovechamiento.*
  - *Menores emisiones de CO<sub>2</sub>.*
- *Criterios técnicos:*
  - *Mayor rendimiento.*
  - *Mayor manejabilidad/operatividad.*
  - *Mayor versatilidad de usos (cortas finales, claras, otros usos).*
  - *Mayor facilidad de movimiento dentro de la masa.*
  - *Mayor diámetro de corte.*

Como se puede apreciar en el esquema, el número de criterios es elevado como para determinar que esta decisión sea de alta complejidad, ya que en la misma se engloban criterios de diferentes tipologías, tendiéndose en cuenta no solamente criterios económicos o técnicos, que son los que habitualmente se evalúan en estos casos, sino también criterios sociales y ambientales, que harán que esta decisión sea más acorde a la sostenibilidad forestal tan demandada en la actualidad.

### **6.2.3 Alternativas**

Al igual que ocurre con los criterios, el número de alternativas también es un punto débil de las metodologías de análisis multicriterio, pues cuando hay muchas alternativas la comparación por pares puede resultar, incluso, inviable.

Para llevar a cabo la comparación entre metodologías, todas las alternativas que se han elegido para la toma de esta decisión son viables y factibles para la consecución del objetivo propuesto, lo cual es un requisito imprescindible en el diseño de cualquier decisión. Dichas alternativas engloban diferencias entre unas y otras, ya que mezclan máquinas nuevas con

usadas, específicas y no específicas para los trabajos forestales, y de diferentes tamaños, además de la alternativa que actualmente está en uso en el ejemplo (la pareja de motoserristas). Así pues, las siete alternativas propuestas han sido:

- *Sampo Rosenlew 1046Pro.*
- *Sampo Rosenlew 1066.*
- *Valmet 911.1.*
- *Tractor Valtra 130 con cabezal Monra 600.*
- *Retroexcavadora JCB 210 con cabezal Kesla 20RHS.*
- *Ponsse Ergo H73A.*
- *Pareja de motoserristas (actualmente en uso).*

En los Anexos a este documento se han incluido unas fichas descriptivas de estas alternativas, que se han entregado a los decisores que han tomado la decisión utilizando las dos metodologías, para que contaran con la información necesaria para realizar las comparaciones por parejas y por tríos.

En este caso hay que tener en cuenta que el número de alternativas es bastante alto, lo que ha determinado que el proceso de decisión haya tenido una duración importante.

#### **6.2.4 Equipo decisor**

A la hora de tomar una decisión, las personas encargadas de hacerlo han de tener los conocimientos precisos para ejercer la comparación y emitir su juicio en los pares o tríos, independientemente de la metodología. En este caso, para la toma de la decisión se ha contado con un grupo de cinco decisores, todos ingenieros de montes, y dos de ellos expertos en maquinaria.

### **6.3 Resultados**

Una vez se ha procedido a realizar el experimento, se han analizado los resultados obtenidos en la captura de juicios de los decisores, que se han analizado por separado para cada metodología para su posterior comparación.

### 6.3.1 Resultados con AHP

Una vez realizadas las evaluaciones con el método AHP, utilizando el programa MPC<sup>®</sup> 2.0 (Pérez-Rodríguez & Rojo-Alboreca 2011, 2012a), se han recopilado todos los resultados obtenidos y se ha procedido a su análisis.

En primer lugar, el factor tiempo ha sido determinante a la hora de que los decisores solamente hayan efectuado una repetición, argumentando razones como monotonía o cansancio en la evaluación por su larga duración, ya que en este ejemplo ha sido necesario evaluar 564 pares. Por ello, todos salvo el decisor 1 han efectuado una única repetición, invirtiendo el tiempo que se puede ver en la Figura 6.1, que ha oscilado entre 40 minutos y casi dos horas, lo que corresponde a un valor medio de 6,9 segundos por cada pareja evaluada.

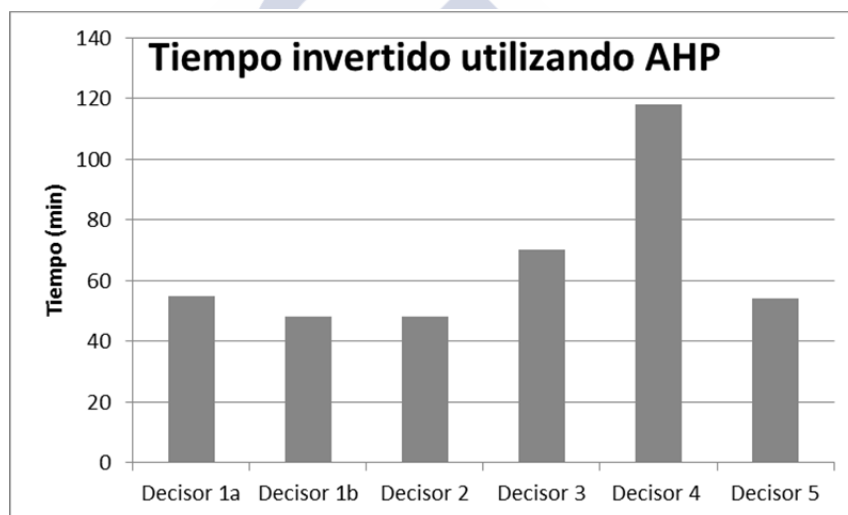
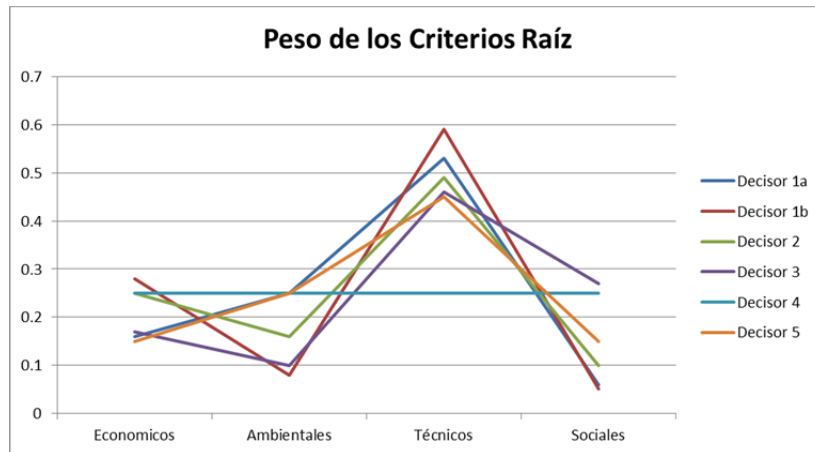


Figura 6.1: Tiempo invertido por los decisores en la evaluación utilizando el método AHP.

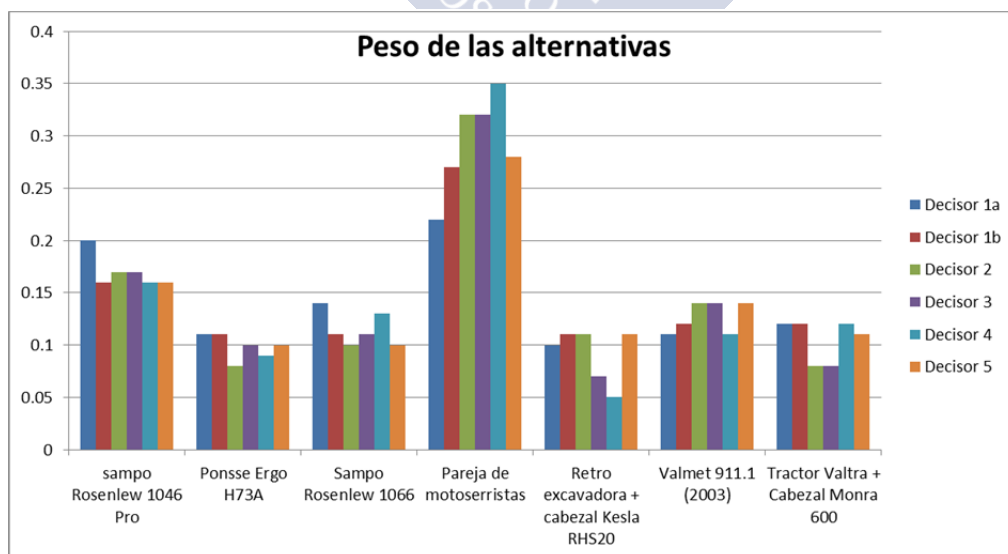
Con respecto a los resultados de los pesos obtenidos, cabe destacar la variabilidad de opiniones entre los diversos decisores. En la Figura 6.2 se observa el peso de los criterios raíz obtenidos por los diversos decisores, donde se puede ver que, por ejemplo, el peso de los criterios *Técnicos* ha variado enormemente, desde 0,25 hasta casi 0,60, aunque todas las decisiones menos una se enmarcan en un intervalo de pesos entre 0,45 y 0,60 para ese grupo de criterios.



**Figura 6.2:** Pesos de los criterios raíz según las opiniones de los diferentes decisores participantes utilizando el método AHP.

Todas las evaluaciones realizadas han sido inconsistentes, algunas ligeramente y otras muy inconsistentes, superándose en algunos casos un ratio de consistencia (*CR*) del 30% (ver apartado 3.2.2.2). Sin embargo, se ha apreciado que el decisor 1 ha reducido su inconsistencia ligeramente en su segunda evaluación, pasando de un 24,5% en los criterios raíz del árbol de decisiones en la primera evaluación a un 17,5% en la segunda, aunque su índice de consistencia sigue siendo muy alto.

De manera global, los resultados obtenidos, que se pueden observar en la Figura 6.3, reflejan que la alternativa con más peso ha sido la *Pareja de motoserristas*, siendo común para todos los decisores. De todas maneras, cabe destacar la variabilidad de los resultados (Tabla 6.1)



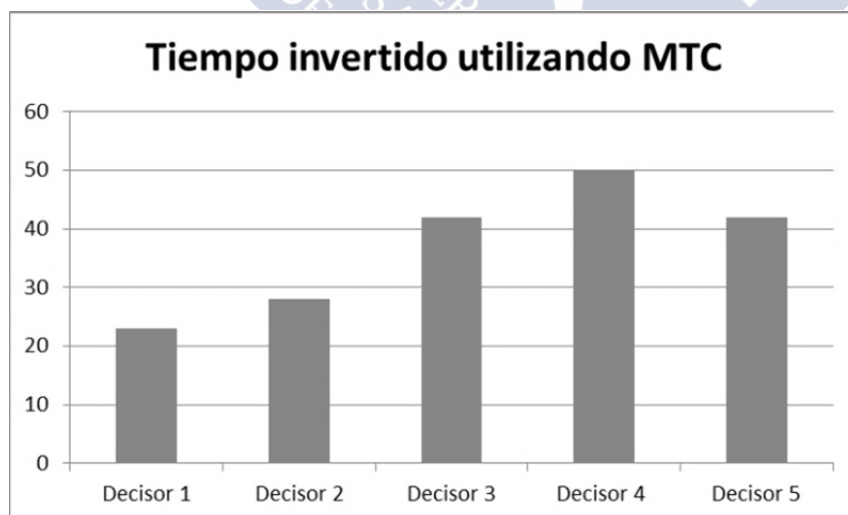
**Figura 6.3:** Resultados globales del peso de cada alternativa aplicando el método AHP.

**Tabla 6.1:** Variabilidad de los resultados obtenidos (en %) aplicando el método AHP.

	Promedio	Desv. est.
Pareja de motoserristas	29,80%	5,02%
Sampo Rosenlew 1046 Pro	17,20%	1,64%
Valmet 911.1 (2003)	12,80%	1,64%
Sampo Rosenlew 1066	11,60%	1,82%
Tractor Valtra + Cabezal Monra 600	10,20%	2,05%
Ponsse Ergo H73A	9,60%	1,14%
Retro excavadora + cabezal Kesla RHS20	8,80%	2,68%

### 6.3.2 Resultados con MTC<sup>©</sup>

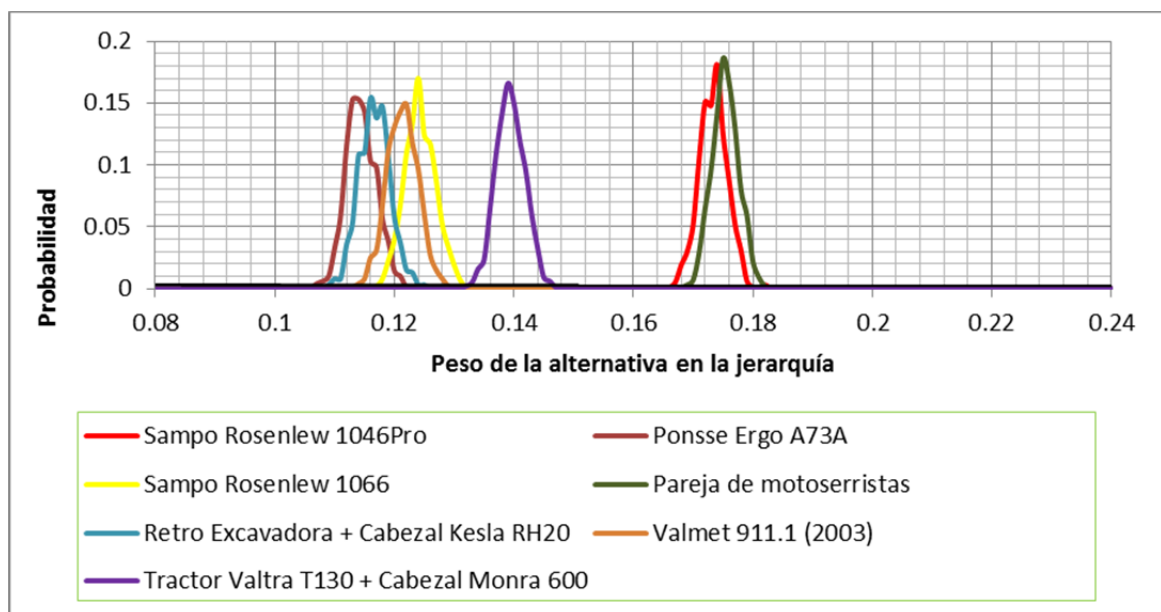
Con respecto al MTC<sup>©</sup>, cada uno de los decisores ha realizado una única evaluación, invirtiendo un tiempo entre 20 y 50 minutos para calificar los 146 triángulos generados en este ejemplo, como se puede observar en la Figura 6.4, lo que corresponde a un valor medio de 15 segundos por cada trío evaluado.



**Figura 6.4:** Tiempo invertido por los decisores en la evaluación utilizando el método MTC<sup>©</sup>.

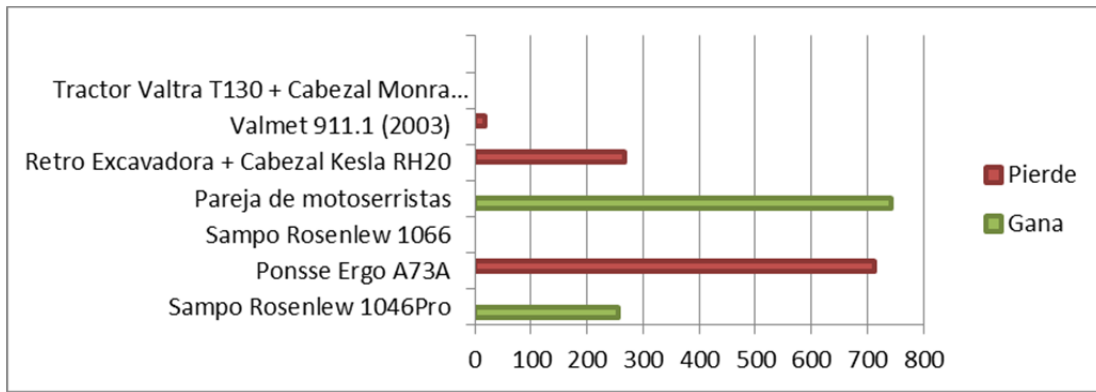
Con respecto a los resultados globales, en esta metodología han de ser analizados decisor por decisor, ya que de manera grupal se realiza una intersección de probabilidades entre cada uno de ellos a nivel de pesos de criterios y alternativas, como se ha indicado en el capítulo 5. Por ello, de manera independiente, el resultado de cada decisor ha sido:

**Decisor 1:** ha invertido 23 minutos en tomar la decisión utilizando el MTC<sup>®</sup>. Según esta evaluación, los resultados obtenidos han sido los que se muestran en la Figura 6.5., donde se puede apreciar que se solapan las alternativas *Pareja de motoserrietas* y *Sampo Rosenlew 1046Pro*.



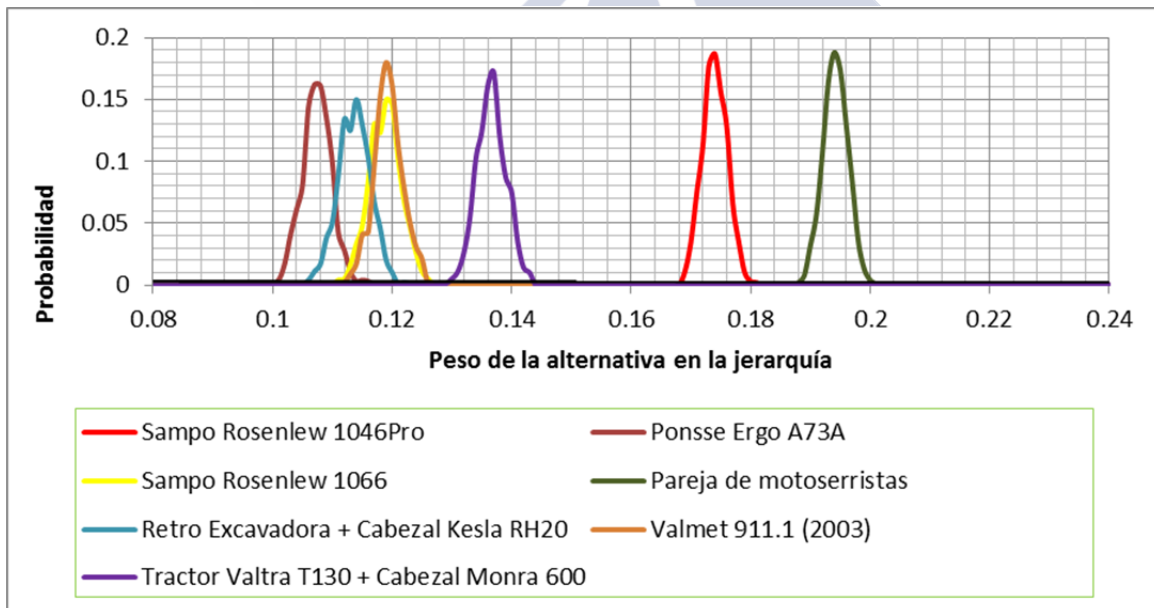
**Figura 6.5:** Resultados de la probabilidad del peso de cada alternativa según el decisor 1 utilizando el método MTC<sup>®</sup>.

En este caso, como no se aprecia gran diferencia entre esas dos primeras alternativas, cada vez que se realiza una iteración según la evaluación realizada se extrae una jerarquía, pudiéndose contar cuántas veces ha ganado una alternativa, y cuántas veces ha quedado de última (ha perdido) una alternativa. El resultado se puede observar en la Figura 6.6, en la que se aprecia que la alternativa *Pareja de motoserrietas* destaca sobre la *Sampo Rosenlew 1046Pro*.



**Figura 6.6:** Resultado de la simulación de mil iteraciones con conteo de la alternativa ganadora (verde) y perdedora (rojo) para el decisor 1 utilizando el método MTC<sup>®</sup>.

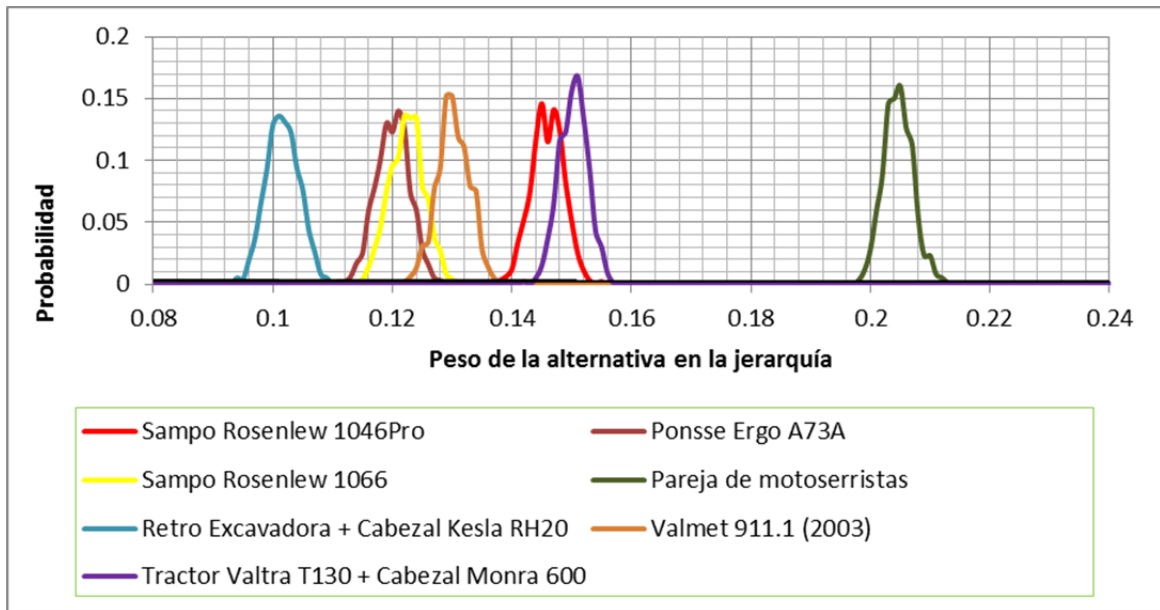
**Decisor 2:** ha invertido 28 minutos en evaluar la decisión con el MTC<sup>®</sup>, y sus resultados se muestran en la Figura 6.7. En ella se puede observar que claramente la alternativa *Pareja de motoserristas* es la vencedora, y que las funciones de probabilidad del peso de las alternativas son muy estrechas, por lo que muestra poca variabilidad en los resultados.



**Figura 6.7:** Resultado de la probabilidad del peso de cada alternativa según el decisor 2 utilizando el método MTC<sup>®</sup>.

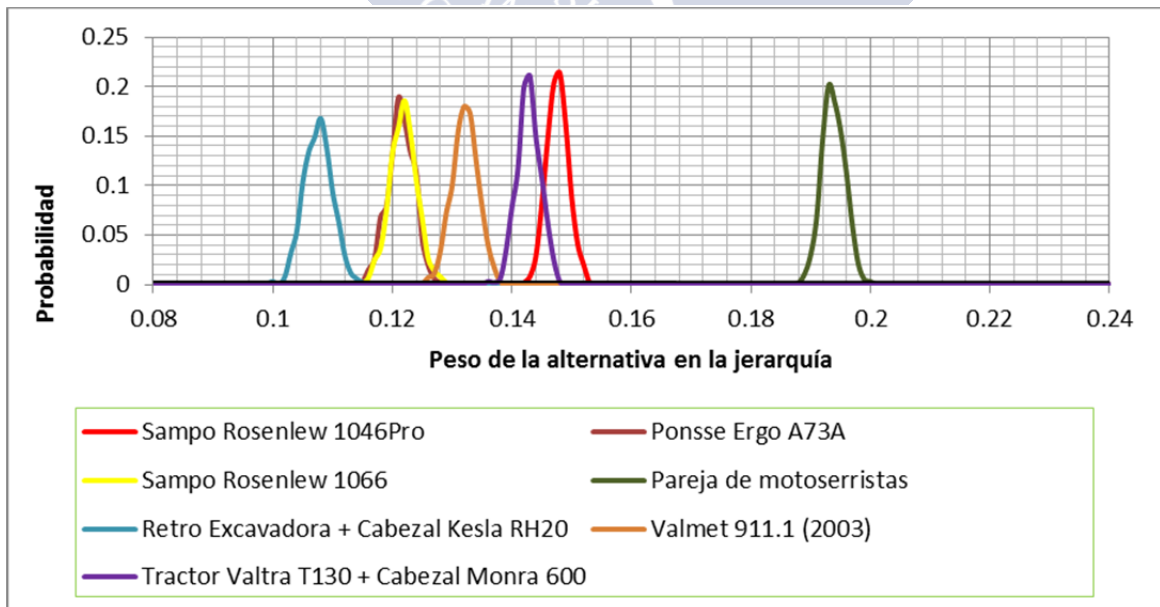
**Decisor 3:** ha necesitado 42 minutos para la realización de la prueba con el MTC<sup>®</sup>, obteniendo los resultados de la Figura 6.8. Al igual que en el decisor anterior, destaca la

alternativa *Pareja de motoserristas*, pero aparece de segunda el *Tractor Valtra*, quedando relegada la alternativa de la *Sampo 1046Pro* al tercer puesto.



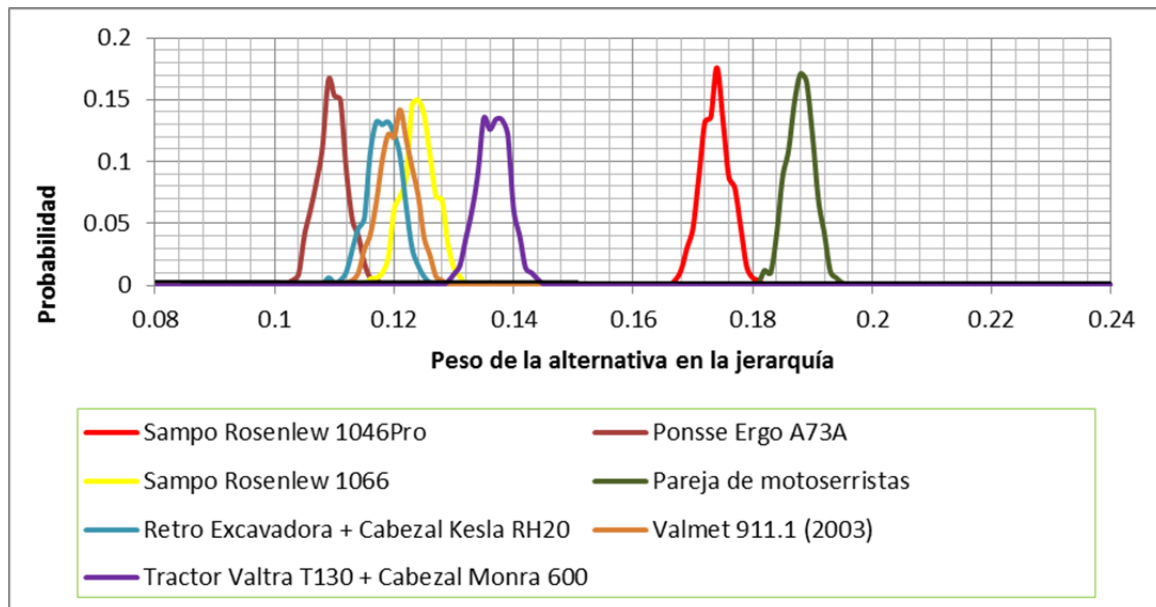
**Figura 6.8:** Resultados de la probabilidad del peso de cada alternativa según el decisor 3 utilizando el método MTC<sup>®</sup>.

**Decisor 4:** Ha invertido 50 minutos en realizar la evaluación, obteniendo los resultados de la Figura 6.9, donde se aprecia que, al igual que en el resto de decisores, destaca la alternativa *Pareja de Motoserristas*.



**Figura 6.9:** Resultados de la probabilidad del peso de cada alternativa según el decisor 4 utilizando el método MTC<sup>®</sup>.

**Decisor 5:** Ha invertido un tiempo de 42 minutos en realizar su evaluación, y al igual que los decisores anteriores ha destacado la alternativa *Pareja de motoserristas*. En este caso, la *Sampo Rosenlew 1046Pro*, segunda opción, ha quedado muy cerca de la primera, como se puede observar en la Figura 6.10.

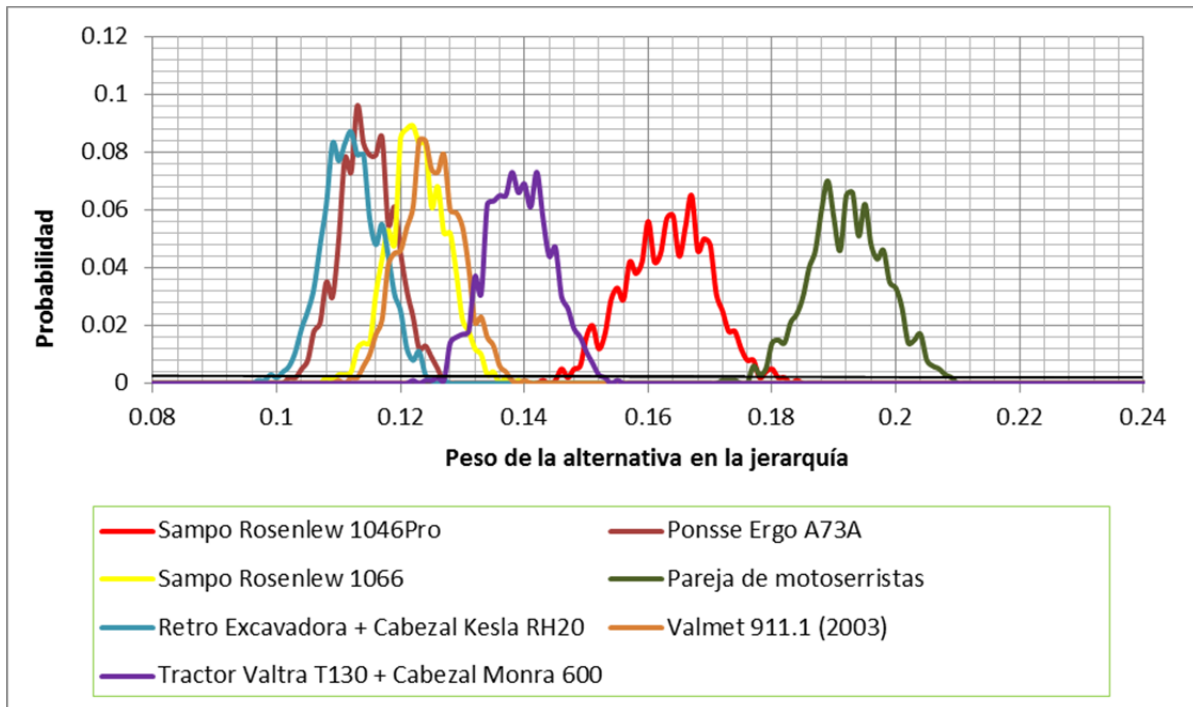


**Figura 6.10:** Resultados de la probabilidad del peso de cada alternativa según el decisor 4 utilizando el método MTC<sup>©</sup>.

### 6.3.3 Decisión grupal con MTC<sup>©</sup>

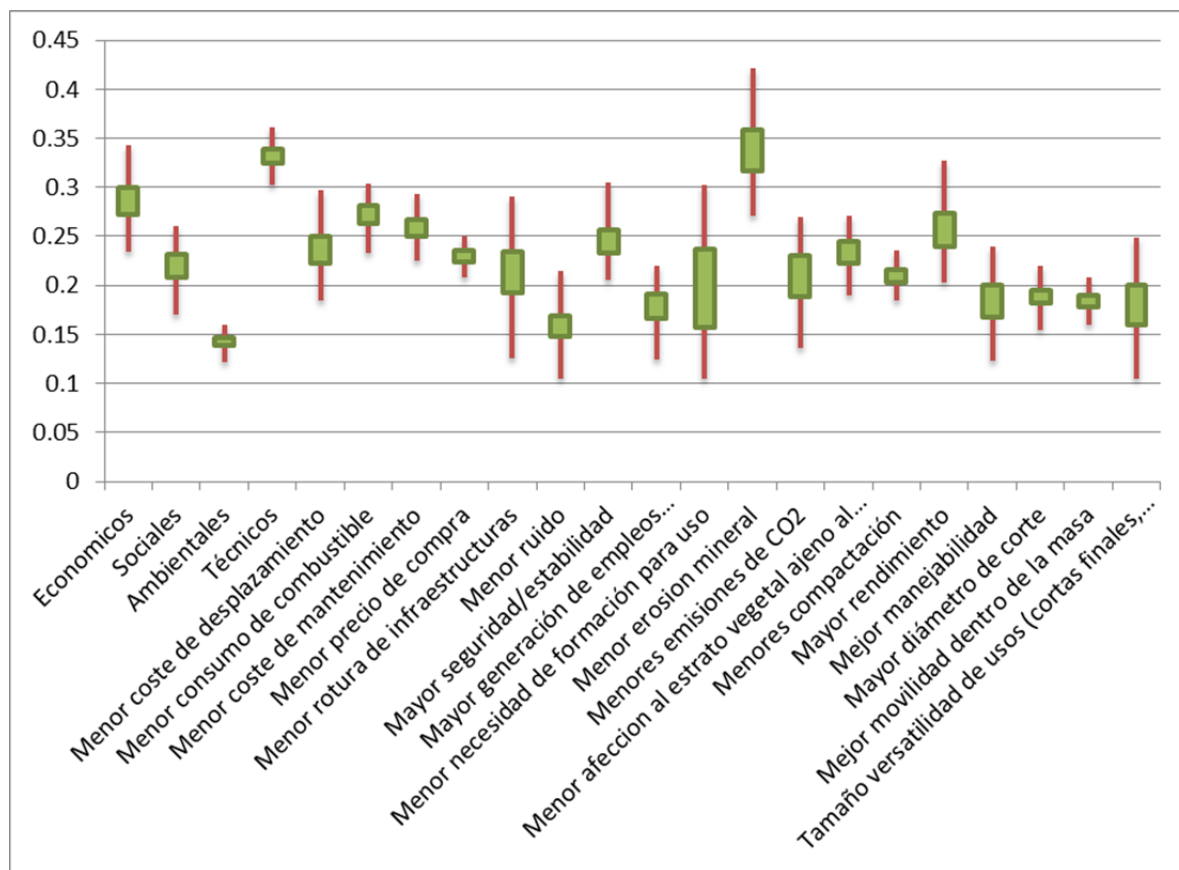
Cada uno de los decisores ha evaluado por separado la decisión propuesta, según su opinión y experiencia, buscando la alternativa satisfactoria, y considerando también la naturaleza de los criterios utilizados y la incertidumbre del contexto. Como es lógico, los decisores que han participado en la evaluación no tienen que estar de acuerdo o tener todos los puntos en común.

Con respecto a las decisiones grupales, con el MTC<sup>©</sup> es posible buscar el consenso de todos los decisores de manera analítica, como se ha indicado en el capítulo 5. En este caso, los resultados obtenidos en grupo para las alternativas de esta decisión se puede observar en la Figura 6.11.



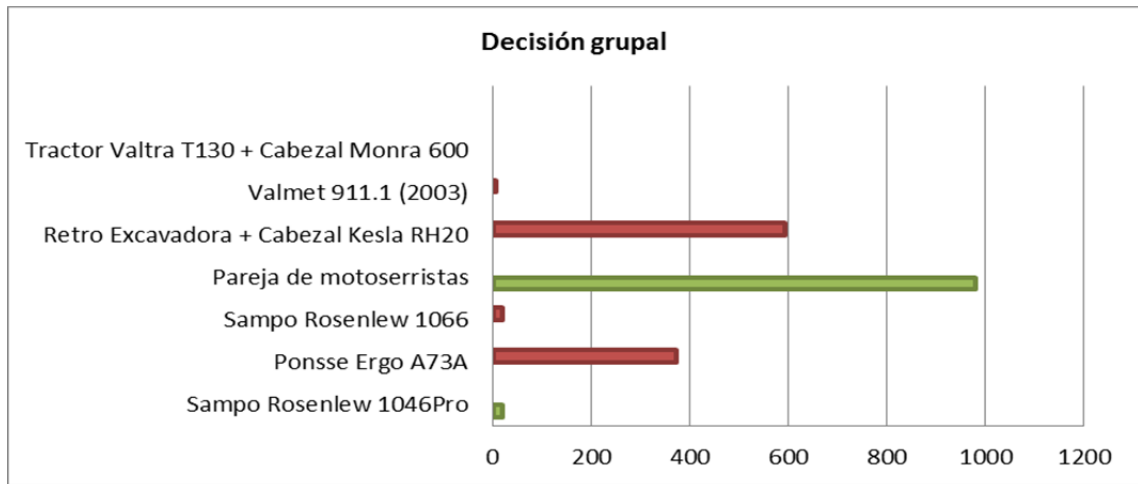
**Figura 6.11:** Resultado de la probabilidad del peso de cada alternativa bajo una simulación grupal de las probabilidades de cada decisor utilizando el método MTC<sup>®</sup>.

Con respecto a los criterios, el resultado obtenido en la evaluación grupal se expone en la Figura 6.12. En ella se puede observar el rango de incertidumbre de cada uno de los criterios, habiendo algunos con poco peso y poca incertidumbre, como el criterio raíz *Ambientales*, y otros con una gran incertidumbre con respecto a su peso, como por ejemplo el de *Menor necesidad de formación para uso*.



**Figura 6.12:** Rangos de incertidumbre obtenidos en la decisión grupal para el peso de cada criterio utilizando el método MTC<sup>®</sup>.

En el procedimiento de la simulación se puede llevar a cabo el conteo de las veces en las que una alternativa ha ganado o quedado en primer lugar de la jerarquía, y de las que ha perdido o conseguido el menor peso en la jerarquía. En este caso, los resultados expuestos en la Figura 6.11 determinan que la probabilidad de que la alternativa *Pareja de motoserristas* quede en primer lugar en la jerarquía es muy alta, y que es menor, o mucho menor, para el resto de las alternativas. El conteo efectuado tras las mil simulaciones se puede observar en la Figura 6.13.



**Figura 6.13:** Resultado del conteo de ganadores (en verde) y perdedores (en rojo) en una simulación de una decisión grupal de mil iteraciones utilizando el método MTC<sup>©</sup>.

Según la simulación efectuada, la *Pareja de motoserristas* gana en un 98,2% de las veces, lo que supone un porcentaje muy alto con respecto al resto de las alternativas. Sin embargo, en muchas ocasiones lo que se necesita es una jerarquía de alternativas por sí, llegado el momento, la primera alternativa no está disponible por diversas razones. En este caso, la jerarquía obtenida con el MTC<sup>©</sup> es la que se muestra en la Tabla 6.2.

**Tabla 6.2:** Jerarquía obtenida como resultado de una simulación de mil iteraciones con el MTC<sup>©</sup>.

	Peso	Desv. est.
<b>Pareja de motoserristas</b>	19,27%	0,63%
<b>Sampo Rosenlew 1046Pro</b>	16,37%	0,69%
<b>Tractor Valtra T130 + Cabezal Monra 600</b>	13,96%	0,53%
<b>Valmet 911.1 (2003)</b>	12,54%	0,48%
<b>Sampo Rosenlew 1066</b>	12,33%	0,47%
<b>Ponsse Ergo A73A</b>	11,51%	0,44%
<b>Retro Excavadora + Cabezal Kesla RH20</b>	11,26%	0,47%

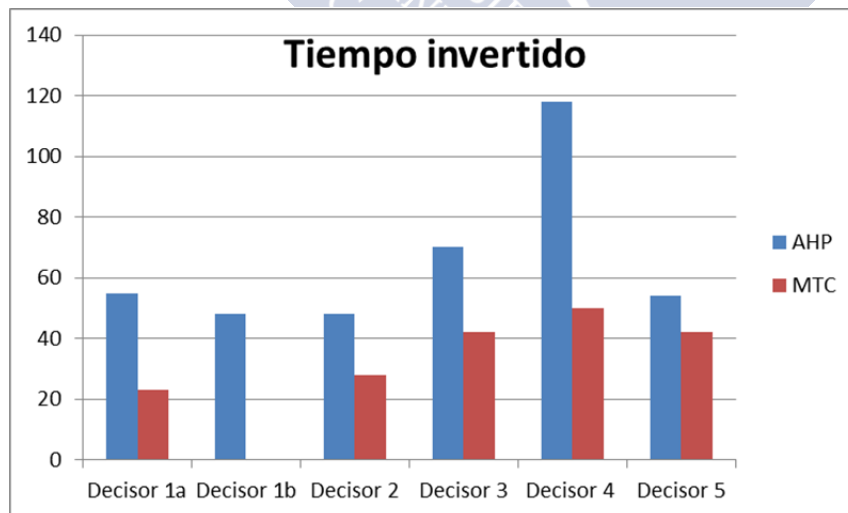
## 6.4 Discusión

Resulta muy complicado concluir de forma categórica si, en general, una metodología es mejor que la otra, pues en casos distintos cada una puede tener sus ventajas e inconvenientes.

En el ejemplo seguido para su comparación, las dos metodologías han llegado al mismo resultado (que en este caso ha sido la elección de la alternativa *Pareja de motoserristas*), lo cual es muy recomendable e indicativo de que ambas se pueden aplicar con garantías en determinados casos, aunque de todas maneras es preciso distinguir entre las bondades e inconvenientes de cada una.

Para ello, y como complemento a todo lo indicado en el apartado 5.4 sobre las ventajas del MTC<sup>®</sup>, es preciso comparar ambas metodologías utilizando ciertos aspectos objetivos en relación al ejemplo práctico utilizado en este capítulo, como el tiempo invertido en la decisión, si es mejor un modelo en base a valores discretos o a rangos, las inconsistencias y la variabilidad en las opiniones de un mismo decisor y entre decisores.

En lo que respecta al tiempo invertido por cada decisor al aplicar las dos metodologías, en la Figura 6.14 se confrontan los resultados expuestos anteriormente en las Figuras 6.1 y 6.4 para facilitar su comparación.



**Figura 6.14:** Tiempo invertido por cada decisor utilizando las metodologías AHP y MTC<sup>®</sup>.

Como puede observarse en dicha Figura, el tiempo dedicado por cada decisor a la evaluación de criterios y de alternativas con el AHP ha sido, como media, el doble del invertido con el MTC<sup>©</sup>. Ello se ha debido al mucho menor número de evaluaciones unitarias que ha sido necesario realizar con el MTC<sup>©</sup> (en el ejemplo, 146 triángulos) frente al elevado número en el AHP (564 parejas, un 386% más en este caso), y todo ello a pesar del mayor tiempo medio que ha supuesto evaluar cada uno de los triángulos del MTC<sup>©</sup> (15 segundos en el ejemplo), por su mayor complejidad, frente a las parejas en el AHP (6,9 segundos, un 46% menos).

Por tanto, resulta evidente que en decisiones donde hay un número de criterios y de alternativas elevado el AHP es muy sensible a la combinatoria, y con ello a la inversión de tiempo necesaria para la toma de la decisión, como también indican Carmone *et al.* (1997). En este caso, el MTC<sup>©</sup> es menos sensible a la cantidad de criterios y/o alternativas que se introducen en la decisión, ya que el crecimiento del número de triángulos a evaluar es lineal, no exponencial.

Una de las posibles soluciones que se adoptan en el AHP a la hora de minimizar el número de pares es la subdivisión en niveles (Saaty 1994), pero en ese caso se debería tener en cuenta que la variabilidad de los pesos de un decisor en repeticiones sucesivas y/o entre diferentes decisores puede llegar a ser notable, y entonces no se produce una transmisión de esa variabilidad de un nudo a otro en el esquema de criterios.

Por otra parte, resulta evidente que es mucho más sencillo comparar una pareja de elementos que un trío, y así lo demuestra el tiempo medio dedicado a cada valoración unitaria con las dos metodologías, aunque precisamente esa mayor dificultad implica una mayor atención por parte de los decisores.

Otra ventaja del MTC<sup>©</sup> es que no se utilizan pesos discretos, sino rangos que representan las incertidumbres que se tienen de ellos, generados mediante iteraciones repetidas un número representativo de veces con el fin de que se pueda asumir que se están teniendo en cuenta todas las posibilidades que hay entre los pesos de cada uno de los criterios/alternativas bajo la incertidumbre acotada.

Con respecto a las inconsistencias, como ya se ha visto en el capítulo 3, existe una dificultad a la hora de asimilar la incertidumbre, ya que es un indicador a nivel matricial. En el MTC<sup>©</sup> no

se utiliza ese indicador, ya que al extraer los pesos de manera aleatoria y retroalimentar el proceso con el cálculo matricial del AHP las matrices son totalmente homogéneas, y por consiguiente no existen inconsistencias.

El proceso de extracción de juicios del MTC<sup>©</sup> se basa en un ciclo cerrado de comparaciones, volviéndose al principio del proceso una vez finalizada la comparación, y con ello es posible conocer la variación de los pesos de los criterios o de las alternativas debido al cambio del contexto en el que se realiza la calificación (es decir, cambiando algún vértice del triángulo), además de extraerse diversas opiniones con referencia a un mismo criterio en distintos periodos temporales.

Con respecto al análisis de sensibilidad, el AHP tiene la posibilidad de variar los pesos con el fin de observar cómo se comporta el resultado final (ver apartado 3.2.3). En el caso del MTC<sup>©</sup> es innecesario realizar un análisis de sensibilidad basado en la variación de pesos, ya que la propia metodología ha sido diseñada para tener en cuenta esa variabilidad. Por ello, cada una de las iteraciones del proceso de simulación se entendería como un análisis de sensibilidad en sí, ya que se selecciona un peso para cada criterio y alternativa en cada una de ellas.

En definitiva, se puede concluir que la metodología AHP, por su sencillez a la hora de evaluar parejas, tiene su mayor utilidad en las “sencillas decisiones complejas”, es decir en aquellas que no incluyan un número muy elevado de criterios y/o alternativas, mientras que el MTC<sup>©</sup> resulta tanto más recomendable cuanto mayor sea el número de criterios y/o alternativas, y también de forma muy especial en las decisiones grupales.



*The pure and simple truth is rarely pure and never simple*

Oscar Wilde





# Capítulo 7

---

## 7 CONCLUSIONES GENERALES

### 7.1 Conclusiones

1. Actualmente existe una gran diversidad de metodologías de análisis multicriterio que sirven de soporte a decisiones complejas, y que se encuadran en lo que se conoce como MCDM (*Multi Criteria Decision Making*), pero no resulta sencillo establecer una clasificación coherente de las mismas debido a los diferentes criterios que utilizan para ello los distintos autores que han tratado el tema y a que muchas metodologías se mezclan, complementan o hibridan entre ellas, dando lugar a otras nuevas.
2. El denominado Proceso Analítico Jerárquico o AHP (*Analytic Hierarchy Process*), basado en la comparación por pares, se ha convertido en el método de toma de decisiones multicriterio más conocido y utilizado en todo el mundo, debido a su simplicidad y versatilidad, existiendo una amplísima bibliografía sobre el mismo.
3. La mayoría de las herramientas informáticas de apoyo a la toma de decisiones multicriterio por métodos cualitativos aplican la metodología AHP, aunque ninguna tiene licencia *open-source*, lo cual destaca poderosamente con la tendencia actual en internet.
4. Las principales limitaciones del método AHP, recogidas en la bibliografía, se pueden resumir en:
  - El axioma de *juicios recíprocos* en las comparaciones pareadas, que es la base del método AHP, no siempre se cumple, debido a la naturaleza subjetiva de ciertos criterios y a los sesgos cognoscitivos que pueden aparecer en el proceso de emisión de juicios, especialmente en las decisiones largas en las que intervienen gran cantidad de criterios y/o alternativas.
  - El AHP es muy sensible al número de criterios y de alternativas, aumentando de forma casi exponencial el número de pares a comparar cuando lo hacen el número de criterios y de alternativas. Esto implica aumentar el tiempo necesario para realizar la evaluación, haciendo el proceso largo y tedioso y favoreciendo la pérdida de

concentración y de consistencia del resultado final, lo que limita la aplicación del AHP a decisiones con un número de criterios y alternativas muy pequeño.

- Para minimizar el número de pares a evaluar es posible establecer esquemas bifurcados de criterios y subcriterios en varios niveles, lo que permite analizarlos por grupos (por criterios o subcriterios raíz). Sin embargo, cuando un criterio raíz tiene un comportamiento subjetivo muy acusado, la dispersión del peso debería ser transferida a los subcriterios en los que se divide.
  - La utilización de la escala propuesta por Saaty suscita diversa controversia, ya que a veces es difícil establecer la preferencia entre dos criterios o alternativas, y además conlleva la aparición de inconsistencias, cuyo indicador cuantifica la homogeneidad de la matriz de comparaciones. Este indicador tiene difícil interpretación, ya que se calcula para el conjunto de criterios o alternativas, por lo que difícilmente se puede asociar a un criterio o a una alternativa.
  - Cuando uno o varios criterios o alternativas evaluados muestran una alta dispersión en el valor de sus pesos, no es posible descartarlos de la decisión ya realizada, y la única solución es repetir nuevamente toda la evaluación sin ellos.
  - De forma similar, resulta imposible introducir un nuevo criterio o una nueva alternativa en una decisión que ya ha sido evaluada.
  - A nivel de grupos el AHP solamente puede utilizarse en decisiones por consenso, en las que siempre van a existir determinados sesgos.
5. Se ha desarrollado un programa informático propio para la aplicación de la metodología AHP, denominado MPC<sup>©</sup> (Método de los Pares de Comparación), en español y competitivo a nivel de análisis, cálculo y base de datos respecto a los actualmente existentes de pago en el mercado, con el objetivo de analizar de manera pormenorizada la metodología a nivel cálculo y de interfaz. Para ello se ha partido de una interfaz sencilla, que posteriormente se ha mejorado en sucesivas versiones, materializadas en la serie de software MPC<sup>©</sup> 1.0, 2.0 y 2.01 MEX, utilizando el lenguaje de programación VB.NET<sup>®</sup>. MPC<sup>©</sup> 1.0 puede descargarse gratuitamente de la Web del grupo de investigación *Unidade de Xestión Forestal Sostible* (UXFS) de la Universidad de Santiago de Compostela (<http://www.usc.es/uxfs/>).
6. El “Método del Triángulo de Calificaciones” (MTC<sup>©</sup>), que es una nueva metodología de toma de decisiones multicriterio que se presenta y describe en esta tesis, trata de

aprovechar las potencialidades del método AHP y de resolver sus comentados inconvenientes. Las principales características y ventajas del MTC<sup>©</sup> son:

- Evaluación de criterios, y de alternativas bajo cada criterio, por tríos en vez de por parejas. La calificación en triángulos incrementa la concentración de la persona que debe tomar la decisión, disminuyendo la influencia del ambiente y minimizando el sesgo cognoscitivo que se pueda producir en el proceso repetitivo de la decisión.
  - Eliminación de escalas y valores discretos en la emisión de juicios. Los triángulos del MTC<sup>©</sup> son superficies continuas que aúnan todas las posibles evaluaciones, y sólo se marcan tendencias graduadas con líneas y círculos que acotan los límites y magnitudes de selección entre los vértices, para ayudar a que el decisor emita su juicio conjunto de los tres criterios a la vez.
  - Importante disminución del número de evaluaciones (tríos) a realizar, respecto al elevado número de pares o parejas que es preciso comparar en la aplicación del método AHP cuando se cuenta con muchos criterios y/o alternativas.
  - Captura de juicios consistentes, que cumplen el axioma de *transitividad*, evitando los inconvenientes del común incumplimiento del axioma de *juicios recíprocos* que se produce en el AHP.
  - Establecimiento de series automatizadas de comparación de criterios y alternativas.
  - Establecimiento de (i) *Vectores de opinión* a partir de las evaluaciones de la serie de triángulos en las que interviene un mismo criterio; (ii) *Superficies de opinión*, de forma elíptica, delimitadas por los rangos o intervalos obtenidos para cada criterio y alternativa; y (iii) *Regiones de probabilidad de las opiniones* de tres dimensiones, con forma de paraboloides elípticos, asignando a cada punto del interior de una superficie de opinión una probabilidad de suceso según una distribución normal bivariante. En sucesivas repeticiones las superficies de opinión y las regiones de probabilidad se pueden ir superponiendo, proporcionando así información de cómo afectan las repeticiones en el tiempo a la decisión, y en el caso de decisiones en grupo se puede valorar el grado de uniformidad existente en las mismas.
7. Al aplicar las metodologías AHP y MTC<sup>©</sup> a un mismo caso práctico se obtiene el mismo resultado (se elige la misma alternativa), lo cual es muy recomendable e indicativo de que ambas se pueden utilizar con garantías en determinados casos. Sin embargo, el MTC<sup>©</sup>

resulta tanto más recomendable cuanto mayor sea el número de criterios y/o alternativas, y también de forma especial en las decisiones grupales.

8. Tanto la metodología AHP como la MTC<sup>©</sup> que se presenta en esta tesis son aplicables al campo forestal, puesto que los requerimientos actuales de la sociedad obligan a considerar en cualquier proyecto, anteproyecto o decisión en gestión forestal un elevado número de criterios (que pueden englobarse en económicos, sociales, medioambientales y técnicos) para que puedan considerarse como sostenibles.



## 7.2 Conclusions

1. A large variety of multi-criteria analysis methods are currently available as aids to complex decision making. These methods, which are included within Multi Criteria Decision Making (MCDM) analysis, are difficult to classify because of the different criteria used by the different researchers who have addressed the topic and because many methods are used together or are modified, giving rise to new methods.
2. The Analytic Hierarchy Process (AHP), which is based on pairwise comparisons, has become the best known multi-criteria decision making method throughout the world because of its simplicity and versatility, and much has been written about the subject.
3. Most software tools that support multi-criteria decision making by qualitative methods apply the AHP method, although none of these have an open-source license, which contrasts greatly with current trends for internet use.
4. The main limitations of the AHP method, reported in the relevant literature, can be summarized as follows:
  - The axiom of *reciprocal judgments* in the pairwise comparisons, which is the basis of the AHP method, is not always fulfilled, because of the subjective nature of certain criteria and the cognitive skews that may occur in the judgment making process, especially in complex decisions involving numerous criteria and/or alternatives.
  - The AHP method is highly sensitive to the number of criteria and alternatives, and the number of pairs for comparison increases almost exponentially with the number of criteria and decision alternatives. This increases the time required for the evaluation, so that the process becomes lengthy and tedious, leading to loss of concentration and consistency of the final decision and thus limiting the application of AHP to decisions involving a small number of criteria and alternatives.
  - It is possible to establish bifurcated schemes for criteria and sub-criteria at several levels, which enables analysis of groups (by root criteria or sub-criteria). However, when evaluation of a root criterion is highly subjective, the weight of the assessment should be transferred directly to the respective sub-criteria.
  - Use of the scale proposed by Saaty has caused some controversy because it is sometimes difficult to establish a preference between two criteria or decision alternatives and it also leads to the appearance of inconsistencies, the level of which

indicate the homogeneity of the comparison matrix. However, this indicator is difficult to interpret as it is calculated for the series of criteria or alternatives rather than any particular one of these.

- When the weights of one or several criteria or decision alternatives under evaluation are highly dispersed, it is not possible to eliminate the criteria/alternatives from the decision already taken, and the only solution is to repeat the evaluation without these criteria/alternatives.
  - Likewise, it is not possible to include a new criterion or alternative once a decision has been taken.
  - At the group level, the AHP can only be used for decisions taken by consensus, which are always skewed in some way.
5. A computer program has been developed specifically for application of the AHP. The program, which is called *Método de los Pares de Comparación* (MPC<sup>©</sup>) in Spanish (Paired Comparison Method), compares favorably (in terms of analytical power, calculations required and the type of database) with existing programs on the market. The program is aimed at providing a detailed analysis of the method at the calculation and interface levels. The initial simple interface has been improved in successive versions of the software, MPC<sup>©</sup> 1.0, 2.0 and 2.01 MEX, developed using VB.NET<sup>®</sup> programming language. MPC<sup>©</sup> 1.0 can be downloaded free of charge from the webpage of the *Unidade de Xestión Forestal Sostible* (UXFS), a research group at the University of Santiago de Compostela (<http://www.usc.es/uxfs/>).
6. The *Método del Triángulo de Calificaciones* (MTC<sup>©</sup>) (a Triangular Assessment Method), which is a new decision-making method presented and described in this thesis, was developed with the aim of making use of the potential of the AHP method, while attempting to overcome the above-mentioned drawbacks of the method. The main characteristics and advantages of the MTC<sup>©</sup> can be summarized as follows:
- Evaluation of criteria and of decision alternatives under each criterion in trios instead of pairs. The triangular assessment increases the concentration of the decision maker by reducing external distractions and minimizes the cognitive skew that may be produced in the repetitive decision-making process.

- Elimination of scales and discrete values involved in the judgments. The MTC<sup>©</sup> triangles are continuous surfaces that link all possible evaluations, and gradual trends are marked with lines and circles that establish the limits and magnitudes of selection between the vertices of the triangle, in order to help the decision maker to judge all three criteria simultaneously.
  - A great reduction in the number of evaluations (trios) required, relative to the large number of pairs that must be compared in application of the AHP method in decisions involving many criteria and/or alternatives.
  - Consistent judgments, which comply with the axiom of *transitivity*, thus avoiding the disadvantage of the frequent non fulfillment of the axiom of *reciprocal judgments* produced in the AHP.
  - Establishment of automatized series of comparison of criteria and alternatives.
  - Establishment of (i) *Opinion vectors*, by evaluation of the series of triangles in which the same criterion is included; (ii) *Elliptical opinion surfaces*, delimited by the ranges or intervals obtained for each criterion and alternative; and (iii) *Three dimensional probability regions for the opinions*, which take the form of elliptic paraboloids and assign a probability of occurrence, according to a normal bivariate distribution, to each point within an opinion surface. In successive repetitions, the opinion surfaces and the probability regions overlap, thus providing information about how the repetitions affect the time required to reach the decision, and in the case of group decisions, enabling evaluation of the degree of uniformity in the decisions.
7. The same result was obtained on applying the AHP and MTC<sup>©</sup> to the same practical example (i.e. the same alternative was selected), which is a good indication that both methods can be successfully applied in certain cases. However, the MTC<sup>©</sup> is recommended for decisions involving a large number of criteria and/or alternatives and particularly for group decisions.
8. The AHP and MTC<sup>©</sup> methods presented in this thesis are applicable to the field of forestry in which society currently demands consideration of numerous criteria (encompassing economic, social, environmental and technical aspects) with the aim of achieving sustainable forestry management.



# Capítulo 8

---

## 8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUARÓN J., ESCOBAR M.T., MORENO-JIMÉNEZ J.M. (2003) Consistency stability intervals for a judgment in AHP decision support systems. *European Journal of Operational Research* 145 (2): 382-393.
- ALTUZARRA A., MORENO J.M., SALVADOR M. (2000) Medidas de influencia para los juicios en el proceso analítico jerárquico (AHP). En: XIV Reunión ASEPELT-España, Oviedo (Spain), Junio 22-23. Disponible en: <http://www.asepelt.org/ficheros/File/Anales/2000-20Oviedo/Trabajos/PDF/204.pdf> (Última visualización 22/01/2013).
- ANDRICH D. (1978) Relationships between the Thurstone and Rasch approaches to item scaling. *Applied Psychological Measurement* 2 (3): 449-460.
- ANGEHRN A., JELASSI T. (1994) DSS research and practice in perspective. *Decision Support Systems* 4-5 (12): 267-275.
- BARBER A., HANSEN P., NADEN R., OMBLER F., STEWART R. (2011) Who's next? A new process for creating points systems for prioritising patients for elective health services. *Economics Discussion Papers* 1104. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10523/1873> (Última visualización 22/01/2013).
- BARZILAI J., COOK W.D., GOLANY B. (1987) Consistent weights for judgments matrices of the relative importance of alternatives. *Operations research* 6 (3): 131-134.
- BARZILAI J., GOLANY B. (1994) AHP rank reversal, normalization and aggregation rules. *INFOR* 32 (2): 57-63.
- BECHARA A. (2003) Risky Business: Emotion, Decision-Making and Addiction. *Journal of Gambling Studies* 19 (1): 23-51.
- BENAYOUN R., ROY B., SUSSMAN B. (1966) ELECTRE: Une méthode pour guider le choix en présence de points de vue multiples. Note de travail 49. SEMA-METRA International. Direction Scientifique.

- BERKELAAR, M. (2005) lpSolve: Interfaz to Lp solve v. 5.5 to solve linear/integer programs. R package version 2005. Disponible en <http://cran.r-project.org/web/packages/lpSolve/> (Última visualización 12/2012).
- BIEDERMAN I., COOPER E.E. (1992) Size invariance in visual object priming. *Journal of Experimental Psychology. Human perception and performance* 18 (1): 121-133.
- BLUMENTHAL A.L. (1977) *The Process of Cognition*, Englewood Cliffs. NJ: Prentice Hall. 230 pp.
- BRANS J.P. (2002) Ethics and Decisions. *European Journal of Operational Research* 136: 340-352.
- BRANS J.P., MARESCHAL B., VINCKE P. (1984). PROMETHEE: A new family of outranking methods in multicriteria analysis. *Operational Research '84* Ed. J.P. Brans, North Holland: 477-490.
- BRANS J.P., VINCKE P.H. (1985) A preference ranking organization method, the PROMETHEE method. *Management Science* 31 (6): 647-656.
- BRANS J.P., VINCKE P.H., MARESCHAL B. (1986) How to select and how to rank projects: The PROMETHEE method. *European Journal of Operational Research* 24 (2): 228-238.
- BRYSON N. (1995) A goal programming method for generating priority vector. *Journal of the Operational Research* 46 (5): 641-648.
- BUCHANAN J.T., HENIG E.J., HENIG M.I. (1998) Objectivity and subjectivity in the decision making process. *Annals of Operations Research* 80 (0): 333-345.
- BUNDESEN C.A. (1998) A computational theory of visual attention. *Philos. Trans. R. Soc. Lond.* 353 (1373): 1271-1281.
- CAO D., LEUNG L.C., LAW J.S. (2008) Modifying inconsistent comparison matrix in analytic hierarchy process: A heuristic approach. *Decision Support Systems* 44: 944-953.
- CARMONE F.J., KARA A., ZANAKIS S. (1997) A Monte Carlo investigation of incomplete pairwise comparison matrices in AHP. *European Journal of Operational Research* 102 (3): 538-553.
- CAVANAGH P. (1999) *Attention: Exporting vision to the mind*. Series on Biophysics and Biocybernetics 8: 129-143.

- CAVANAGH P., HE S., INTRILIGATOR J. (1999) Attentional resolution: The grain and locus of visual awareness. *Series on Biophysics and Biocybernetics* 8: 41-52.
- CAVANAGH P., LABIANCA A.T., THORNTON I. M. (2001) Attention-based visual routines: Sprites. *Cognition* 80 (1-2): 47-60.
- CHOO E.U., WEDLEY W.C. (2008) Comparing Fundamentals of Additive and Multiplicative Aggregation in Ratio Scale Multi-Criteria Decision Making. *The Open Operational Research Journal* 2 (1): 1-7.
- CHUN M.M., CAVANAGH P. (1997) Seeing two as one: Linking apparent motion and repetition blindness. *Psychological Science* 8 (2): 74-79.
- COULTER E.D., SESSIONS J., WING M.G. (2003). An exploration of the Analytic Hierarchy Process and its potential for use in forest engineering. In *Proceedings of Council on Forest Engineering*, University of Maine, Orono, September 7-10.
- DAVIS L. (1987) *Genetic algorithms and simulated annealing*. Morgan Kaufman Publishers, Inc. 216 pp.
- DÍAZ-BALTEIRO L., ROMERO C. (2008) Making forestry decisions with multiple criteria: A review and an assessment. *Forest Ecology and Management* 255: 3222-3241.
- DONEGAN H.A., DODD F.J., MCMASTER T.B.M. (1992) A new approach to AHP decision-making. *The Statistician* 41 (3): 295-302.
- DONG Y.C., XU Y.F., LI H.Y., DAI M. (2008) A comparative study of the numerical scales and the prioritization methods in AHP. *European Journal of Operational Research* 186 (1): 229-242.
- DONG Y.C., ZHANG G., HONG W.G., XU Y. (2010) Consensus models for AHP group decision making under row geometric mean prioritization method. *Decision Support Systems* 49 (3): 281-289.
- DYER R.F., FORMAN E.H. (1992) Group decision support with the analytic hierarchy process. *Decision Support Systems* 8 (2): 99-124.
- EDWARDS W. (1954) The theory of decision making. *Psychological Bulletin* 41: 380-417.
- EINHORN H.J., HOGARTH R.M. (1981) Behavioral Decision Theory: Processes of Judgment and Choice. *Journal of Accounting Research* 19 (1): 1-31.
- EOM S.B. (1996) Mapping the intellectual structure of research in decision support systems through author cocitation analysis (1971-1993). *Decision Support Systems* 16 (4): 315-338.

- ESCOBAR M.T., MORENO-JIMÉNEZ J.M. (2002) A linkage between the Analytic Hierarchy Process and the Compromise Programming Models. *The International Journal of Management Science* 30 (5): 359-365.
- ESHLAGHY A.T., HOMAYONFAR M. (2011) MCDM methodologies and applications: A literature review from 1999 to 2009. *Research Journal of International Studies* 21: 86-137.
- ESPINASSE B., PICOLET G., CHOURAQUI E. (1997) Negotiation support systems: A multi-criteria and multi-agent approach. *European Journal of Operational Research* 103: 389-409.
- ESTRADA F. (2007) Herbert A. Simon y la economía organizacional. *Cuadernos de Economía* 26 (46): 169-199.
- FEINSTEIN J.L., LUMLEY R. (2001) Theoretical and practical aspects of AHP using a scale derived from the time it takes to decide between two choices instead of one derived from "1-9" estimates. In proceedings 6<sup>th</sup> ISAHP 2001, Berne, Switzerland, August 2-4. Disponible en: <http://www.isahp.org/2001Proceedings/Papers/115-P.pdf> (Última visualización 22/01/2013).
- FINAN J.S., HURLEY W.J. (1997) Transitive calibration of the AHP verbal scale. *European Journal of Operational Research* 112 (2): 367-372.
- FORMAN E.H., GASS S.I. (2001) The Analytic Hierarchy Process, An exposition. *Operations Research* 49 (4): 469-486.
- GADOW K.V., BREDENKAMP B. (1992) Forest management, Academica, Pretoria. 151pp.
- GASS S.I., RAPCSÁK T. (1998) A note on synthesizing group decisions. *Decision Support Systems* 22 (1): 59-63.
- GASS S.I. (2005) Model World: The great debate - MAUT Versus AHP. *Interfaces* 35 (4): 308-312.
- GENTNER D. (1983). Structure-mapping: A theoretical framework for analogy. *Cognitive Science* 7: 155-170.
- GLOBER F. (1989) Tabu search Part I. *ORSA Journal of Computing* 1: 190-206.
- GLOBER F. (1990) Tabu search Part II. *ORSA Journal of Computing* 2: 4-32.
- GORRY G.A., SCOTT-MORTON M.A. (1971) A Framework for Management Information Systems. *Sloan Management Review* 13 (1): 55-70.

- HANDELMAN S. (2009) Thought manipulation: The use and abuse of psychological trickery. Greenwood Publishing Group. 165 pp.
- HANSEN P., OMBLER F. (2009) A new method for scoring multi-attribute value models using pairwise rankings of alternatives. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis* 15 (3-4): 87-107.
- HAYES-ROTH F., WATERMAN D., LENAT D. (1984) Building expert systems. Addison-Wesley, Reading, MA. USA. 444 pp.
- HE S., CAVANAGH P., INTRILIGATOR J. (1997) Attentional resolution. *Trends in Cognitive Science* 3 (1): 115-121.
- HENDERSON J.M., HOLLINGWORTH A. (2003) Eye movements and visual memory: Detecting changes to saccade targets in scenes. *Perception & Psychophysics* 65 (1): 58-71.
- HOLLINGWORTH A. (2007) Object-position binding in visual memory for natural scenes and object arrays. *Journal of experimental psychology: Human perception and performance* 33 (1): 21-47.
- HUGHES E. P., KEARNEY T. D. (2003) Optimization with the SAS system: What it is, whats new, and why you should be using it. SAS Institute. Disponible en: <http://www2.sas.com/proceedings/sugi28/276-28.pdf> (Última visualización 10/02/2013).
- HWANG, C.L.; YOON, K. (1981). Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications. New York: Springer-Verlag. 259 pp.
- IANDOLI L., RIPPA P., SCARANO A., ZOLLO G. (2006) Un enfoque cognitivo del FHA para corregir sesgos en el juicio de expertos: aplicación a un caso. *Cuadernos del CIMBAGE* 8: 37-61.
- IGNIZIO J.P., ROMERO C. (2003) Goal Programming. *Encyclopedia of Information System* 2: 489-500.
- ISHIZAKA A., LABIB A. (2009) Analytic Hierarchy Process and Expert Choice: Benefits and Limitations. *Operational Research Society* 22 (4): 201-220.
- KAHNEMAN D., TVERSKY A. (1979) Prospect Theory: An analysis of decision under risk. *Econometrica* 47 (2): 263-291.

- KANGAS J., KANGAS A. (2005) Multiple criteria decision support in forest management. The approach, methods applied, and experiences gained. *Forest Ecology and Management* 207 (1-2): 133-143.
- KANGAS A., KANGAS J., KURTTILA M. (2008) *Decision Support for Forest Management*. Springer Science. 221 pp.
- KEENEY R., RAIFFA H. (1976) *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs*. John Wiley & Sons, New York. 569 pp.
- KOLODNER J. (1993) *Case-Based Reasoning*. Kluwer Academic Publishers. USA. 175 pp.
- KURTILLA M., PESONEN M., KANGAS J., KAJANUS M. (2000) Utilizing the analytic hierarchic process (AHP) in SWOT analysis - a hybrid method and its application to forest certification case. *Forest Policy and Economics* 1 (1): 41-52.
- LAI V.S., WONG B.K., CHEUNG W. (2002) Group decision making in a multiple criteria environment: A case using the AHP in software selection. *European Journal of Operation Research* 137 (1): 134-144.
- LAININEN P. (2001) On the covariance structure and simultaneous comparisons of the estimates of AHP-Weights. In proceedings 6<sup>th</sup> ISAHP, Berne, Switzerland, August 2-4. Disponible en: <http://www.isahp.org/2001Proceedings/Abstracts/074-A.pdf> (Última visualización: 21/1/2013).
- LAWLER E.L., WOOD D.E. (1966) Branch-and-Bound Methods: A Survey. *Operations Research* 14 (4): 699-719.
- LEE R.M. (1985) Database inferencing for decision support. *Decision Support Systems* 1 (1): 57-68.
- LESKINEN P., KANGAS J. (1998) Analysing uncertainties of interval judgment data in multiple-criteria evaluation of forest plans. *Silva Fennica* 32 (4): 363-372.
- LINKOV I., RAMADAN A.B. (2004) *Comparative Risk Assessment and Environmental Decision Making*. Springer. 448 pp.
- LÓPEZ-PUGA J., GARCÍA-GARCÍA J., FUENTE-SÁNCHEZ L., FUENTE SOLANA E.I. (2007) Las redes bayesianas como herramientas de modelado en psicología. *Anales de psicología* 23 (2): 307-316.
- LUCE R.D. (1994) Thurstone and sensory scaling: then and now. *Psychological Review* 101 (2): 271-277.

- MARTÍNEZ C.B. (2007) Emociones y cerebro. *Rev. R. Acad. Cienc. Exact. Fís. Nat.* 101 (1): 59-68.
- MARTÍNEZ-SELVA J.M., SÁNCHEZ-NAVARRO J.P., BECHARA A., ROMÁN F. (2006) Mecanismos cerebrales de la toma de decisiones. *Neurol.* 42 (7): 411-418.
- MATEU-FIGUERAS G., MARTÍN-FERNÁNDEZ J.A., PAWLOWSKY-GLAHN V., BARCELÓ-VIDAL C. (2003) El problema del análisis estadístico de datos composicionales. En: 27<sup>th</sup> Congreso Nacional de Estadística e Investigación Operativa. Lleida, Abril 8-11: 480-488. Disponible en: [http://ima.udg.edu/~barcelo/index\\_archivos/paper\\_INTRO\\_MMPB.pdf](http://ima.udg.edu/~barcelo/index_archivos/paper_INTRO_MMPB.pdf) (Última visualización 21/03/2013).
- MATSATSINIS N.F., SAMARAS A.P. (2001) MCDA and preference disaggregation in group decision support systems. *European journal of Operational Research* 130: 414-429.
- MELLERS B.A., SCHWARTZ A., COOKE A.D.J. (1998) Judgment and decision making. *Annu. Rev. Psychol.* 49: 447- 477.
- MENDOZA G.A., MARTINS H. (2006) Multi-criteria decision analysis in natural resource management: A critical review of methods and new modelling paradigms. *Forest Ecology and Management* 230 (1): 1-22.
- MUSÁLEM L.F.J. (1979) Las bases y primeras acciones del programa nacional de mejoramiento silvícola en bosques de coníferas. S.A.G.- S.F.F. 102 pp.
- NEMATI H.R., STEIGER D.M., IYER L.S., HERSCHEL R.T. (2002) Knowledge warehouse: an architectural integration of knowledge management, decision support, artificial intelligence and data warehousing. *Decision Support Systems* 33 (2): 143-161.
- NEVO D., WANDB Y. (2005) Organizational memory information systems: a transactive memory approach. *Decision Support Systems* 39 (4): 549-562.
- NGWENYAMA O.K., BRYSON N., MOBOLURIN A. (1996) Supporting facilitation in group support systems: Techniques for analyzing consensus relevant data. *Decision Support Systems* 16 (2): 155-168.
- NIEMIRA M.P., SAATY T.L. (2004) An Analytic Network Process model for financial-crisis forecasting. *International Journal of Forecasting* 20: 573-587.

- ODDERSHEDE A., ARIAS A., CANCINO H. (2005) Rural development decision support using analytic hierarchy process. En: 8th ISAH, Honolulu, Hawaii (USA), July 8-10. Disponible en:  
[http://www.isahp.org/2005Proceedings/Papers/OddershedeA\\_AriasA\\_Cancino\\_Rural\\_Development.pdf](http://www.isahp.org/2005Proceedings/Papers/OddershedeA_AriasA_Cancino_Rural_Development.pdf) (Última visualización: 21/03/2013).
- OSEI-BRISON K.M. (2006) An action learning approach for assessing the consistency of pairwise comparison data. *European Journal of Operational Research* 174 (1): 234-244.
- PASALODOS-TATO M., PUKKALA T. (2007) Optimising the management of even-aged *Pinus sylvestris* L. stands in Galicia, north-western Spain. *Annals of Forest Science* 64: 787-798.
- PAULSON D., ZAHIR S. (1995) Consequences of uncertainty in the Analytic Hierarchy Process: A simulation approach. *European Journal of Operational Research* 87 (1): 45-75.
- PEACOCK S.J., RICHARDSON J.R.J., CARTER R., EDWARDS D. (2007) Priority setting in health care using multi-attribute utility theory and programme budgeting and marginal analysis (PBMA). *Social Science & Medicine* 64 (4): 897-910.
- PENA DE LADAGA S., BERGER A. (2006) Toma de decisiones en el sector agropecuario. Editorial Facultad Agronomía. Buenos Aires. 308 pp.
- PÉREZ-RODRÍGUEZ F. (2009) Desarrollo de un software para la aplicación del método AHP de ayuda a la toma de decisiones. Empleo en la gestión forestal. Trabajo Fin de Carrera. Universidad de Santiago de Compostela (Inédito).
- PÉREZ-RODRÍGUEZ F., ROJO-ALBORECA A. (2009) El método del triángulo de calificaciones (MTC): Una alternativa para la toma de decisiones dentro del método AHP (Analytic Hierarchy Process). 5º Congreso Forestal Español. Ávila (España), 21-25 septiembre 2009. En: 2009. S.E.C.F.-Junta de Castilla y León (eds.). *Actas del 5º Congreso Forestal Español (Ref.:5CFE01-001)*: 1-10. Sociedad Española de Ciencias Forestales. Pontevedra.
- PÉREZ-RODRÍGUEZ F., ROJO-ALBORECA A. (2011). MPC 2.0<sup>©</sup>, software para la aplicación del método AHP de toma de decisiones multicriterio. *Recursos rurales* 7: 27-33.

- PÉREZ-RODRÍGUEZ F., ROJO-ALBORECA A. (2012a) Forestry application of the AHP by use of MPC<sup>©</sup> software. *Forest Systems* 21 (3): 418-425.
- PÉREZ-RODRÍGUEZ F., ROJO-ALBORECA A. (2012b) A Triangular Assessment Method. *Conf-IRM 2012*. En: *Proceedings of Conf-IRM 2012*. Disponible en: <http://aisel.aisnet.org/confirm2012/19> (Última visualización 21/01/2013).
- PRIETO R.J.A., HERNÁNDEZ D.C. (2007) Estudio Regional Forestal. Caso UMAFOR N° 1001, Guanaceví, Durango.
- PUKKALA T., KANGAS J. (1993) A heuristic optimization method for forest planning and decision-making. *Scandinavian Journal of Forest Research* 8 (1-4): 560-570.
- PUKKALA T., KANGAS J. (1996) A method for incorporating risk and risk attitude into forest planning. *Forest Science* 42 (2): 198-205.
- RAHARJO J., HALIM S., WANTO S. (2001) Evaluating comparison between consistency improving method and resurvey in AHP. En: *Proceedings 6th ISAHP*, Berne, Swizerland, August 2-4. Disponible en: <http://www.isahp.org/2001Proceedings/Papers/006-P.pdf> (Última visualización en 21/01/2013).
- REINEKE L.H. (1933) Perfecting a stand-density index for even-aged forests. *Journal of Agricultural Research* 46: 627-638.
- REYNA S., CARDÉIS I., ROMERO F. (1999) Valoración AHP de los ecosistemas naturales de la Comunidad Valenciana. *Revista valenciana d'estudis autonòmics* 27: 153-177.
- RODRÍGUEZ C.R., MENDOZA M.R., BARRENA G.R. (1960) El Método Mexicano de Ordenación de Montes. En: *Algunas Prácticas de Ordenación de Montes*. Comisión Forestal del Estado de Michoacán: 9-74.
- ROMERO C. (1993) *Teoría de la decisión multicriterio: conceptos, técnicas y aplicaciones*. Alianza Editorial, Alianza Universidad Textos. Madrid. 195 pp.
- ROSALES S.P.H., OLAYO M.A., MORALES J.A., ALVAREZ R., MARTÍNEZ I., CASTRO S., MUSÁLEM F.J. (1982) *El método de desarrollo silvícola, una alternativa de ordenación de bosques*. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 406 pp.
- ROY B., BERTIER, E. (1973) La methode ELECTRE II-Une application au media-planning. *OR '72*, M. Ross (ed.): 291-302.

- SAATY R.W. (2003) Validating the Analytic Hierarchy Process and the Analytic Network Process with applications having known and measurable outcomes. En: Proceedings of ISAHP 2003, Bali (Indonesia), August 7-9. Disponible en: <http://www.isahp.org/2003Proceedings/paper/p04.pdf> (Última visualización: 21/03/2013).
- SAATY T.L. (1977) A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology* 15 (3): 234-281.
- SAATY T.L. (1980) *The Analytic Hierarchy Process. Planning priority setting, resource allocation.* McGraw-Hill. New York. 287 pp.
- SAATY T.L. (1986) Axiomatic Foundation of the Analytic Hierarchy Process. *Management Science* 32 (7): 841-855.
- SAATY T.L. (1990) *Decision making for Leaders. The Analytic Hierarchy Process for decision in a complex World.* University of Pittsburgh. RWS Publications, Pittsburgh, USA. 292 pp.
- SAATY T.L. (1994). *Fundamentals of decision making.* Pittsburgh: RWS Publications. 478 pp.
- SAATY T.L. (1996a) *Decision making with dependence and feedback: The analytic network process,* RWS Publications, 4922 Ellsworth Ave. Pittsburgh, PA. 370 pp.
- SAATY T.L. (1996b) Ratio scales are fundamental in decision making. In proceedings of 4<sup>th</sup> ISAHP 1996, Vancouver (Canada), July 12-15: 146-156.
- SAATY T.L. (2003) Decision-Making with the AHP: Why is the principal eigenvector necessary. *European Journal of Operational Research* 145(1):85-91.
- SAATY T.L. (2004) *Mathematical Methods of Operational Research.* Dover Phoenix Editions. 471 pp.
- SAATY T.L. (2005) *Theory and Applications of the Analytic Network Process.* Pittsburgh, PA: RWS Publications, 4922 Ellsworth Avenue, Pittsburgh, PA 15213. 352 pp.
- SAATY T.L. (2008) Decision making with the analytic hierarchy process. *Int. J. Service Sciences* 1 (1): 83-98.
- SALO A.A., HÄMÄLÄINEN R.P. (1997) On the Measurement of Preferences in the Analytic Hierarchy Process. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis* 6: 309-319.

- SCHOMOLDT D.L., KANGAS J., MENDOZA G.A., PESONEN M. (2001) *The Analytic Hierarchy Process in natural resource and environmental decision making*. Kluwer Academic Publishers, London. 328 pp.
- SCHONER B., WEDLEY W. (2007) Ambiguous Criteria Weights in AHP: Consequences and Solutions. *Decision Science* 20 (3): 468-475.
- SCHRAGE L. (1991) *LINDO: an optimization modelling system*. The Scientific Press, South San Francisco. 370 pp.
- SHIM J.P., WARKENTIN M., COURTNEY J.F., POWER D., SHARDA R., CARLSSON C. (2002) Past, present, and future of decisions support technology. *Decision Support Systems* 33 (2): 111-126.
- SIMON H.A. (1956) Rational choice and the structure of the environment, *Psychological Review* 63 (2): 129-138.
- SIMON H.A. (1957) *Models of man; social and rational*. Oxford, England: 287 pp.
- TAM C.M., TONG T.K.L., CHIU G.W.C. (2006) Comparing non-structural fuzzy decision support system and analytical hierarchy process in decision-making for construction problems. *European journal of Operational Research* 174 (2): 1317-1324.
- TAYLOR W., LAKING G. (2010) Value for money – recasting the problem in terms of dynamic access prioritization. *Disability & Rehabilitation* 32 (12): 1020-1027.  
Disponibile en: <http://informahealthcare.com/doi/abs/10.3109/09638281003775535> (Última visualización 12/12/2012).
- THE MATHWORKS® (1998) *MATLAB®*. MU Guide-INC, Natick. Disponibile en: <http://www.mathworks.es/products/matlab/> (Última visualización 01/02/2012).
- THURSTONE L.L. (1927) A law of comparative judgement. *Psychological Review* 34 (4): 273-286.
- THURSTONE L.L. (1929) The Measurement of Psychological Value. In T.V. Smith and W.K. Wright (Eds.), *Essays in Philosophy by Seventeen Doctors of Philosophy of the University of Chicago*. Chicago: Open Court: 157-174.
- TORNIMBENI S., PÉREZ E., OLAZ, F. (2008). *Introducción a la psicometría*. Ed. Paidós Buenos Aires: 289 pp.
- TORRES-ROJO J.M, SÁNCHEZ-OROIS S. (2005) A decision support system for optimizing the conversion of rotation forest stands to continuous cover forest stands. *Forest Ecology and Management* 207: 109-120.

- TREISMAN A.M., KANWISHER N.G. (1998) Perceiving visually presented objects: recognition, awareness and modularity. *Current Opinion in Neurobiology* 8: 218-226.
- TRIANANTAPHYLLOU E. (2000). *Multi-Criteria Decision Making: A Comparative Study*. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers. 320 pp.
- TRIANANTAPHYLLOU E., SÁNCHEZ A. (1997) A sensitivity analysis approach for some deterministic multi-criteria decision making methods. *Decision Sciences* 28 (1): 151-194.
- VACHAJITPAN P. (2004) Measurement scales and derivation of priorities in pairwise and group decision making. *MCDM 2004*. Whistler, B.C., Canada. August 6-11.
- VÉLEZ I. (2003) *Decisiones empresariales bajo riesgo e incertidumbre*. Grupo Editorial Norma. 469 pp.
- VITORIANO B. (2007) *Teoría de la Decisión: Decisión con Incertidumbre, Decisión Muticriterio y Teoría de Juegos*, Universidad Complutense de Madrid. 106 pp.
- WANG M., LIN S.J., LO Y.C. (2010) The comparison between MAUT and PROMETHEE. *Proceedings of International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, Macau, December 7-10: 753-757.
- WEBER M. (1944) *Economía y sociedad. Esbozo de la sociología comprensiva*. Fondo de Cultura Económica. 1251 pp.
- WEDLEY W.C., CHOO E.U. (2001) A unit interpretation of multi-criteria ratios. En: *Proceedings of 6<sup>th</sup> ISAHP 2001*, Berne, Swizerland, August 2-4. Disponible en: <http://www.isahp.org/2001Proceedings/Papers/114-P.pdf> (Última visualización 22/01/2013).
- WIJNMALEN D.J.D., WEDLEY W.C. (2009) Correcting illegitimate rank reversals. Proper adjustment of criteria weights prevent alleged AHP intransitivity. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis* 15 (5-6): 135-141.
- ZADEH L.A. (1965) Fuzzy sets. *Information and Control* 8 (3): 338-353.
- ZANAZZI J.L. (2003) Anomalías y supervivencia en el método de toma de decisiones de Saaty. *Problemas del Conocimiento en Ingeniería y Geología* 1: 148-170.
- ZESHUI X.M, CUIPING W. (1999) A consistency improving method in the Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research* 116 (2): 443-449.


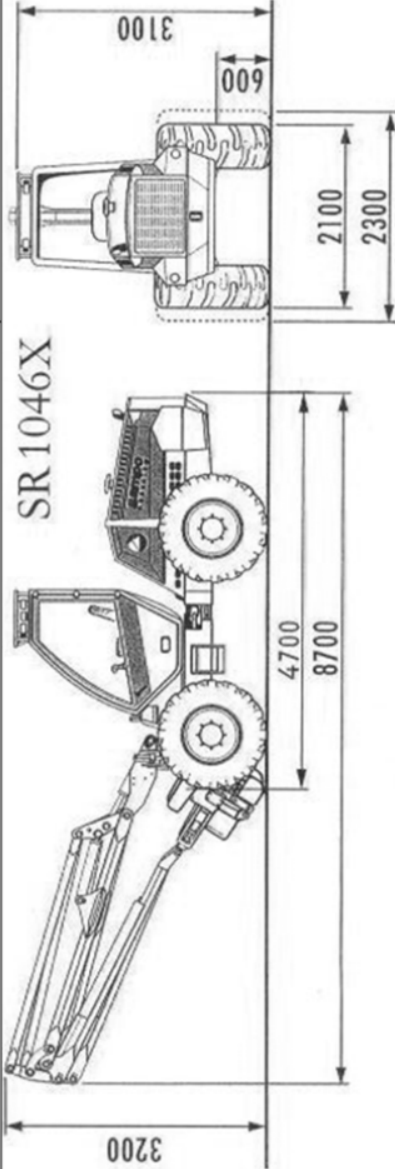
# Anexos


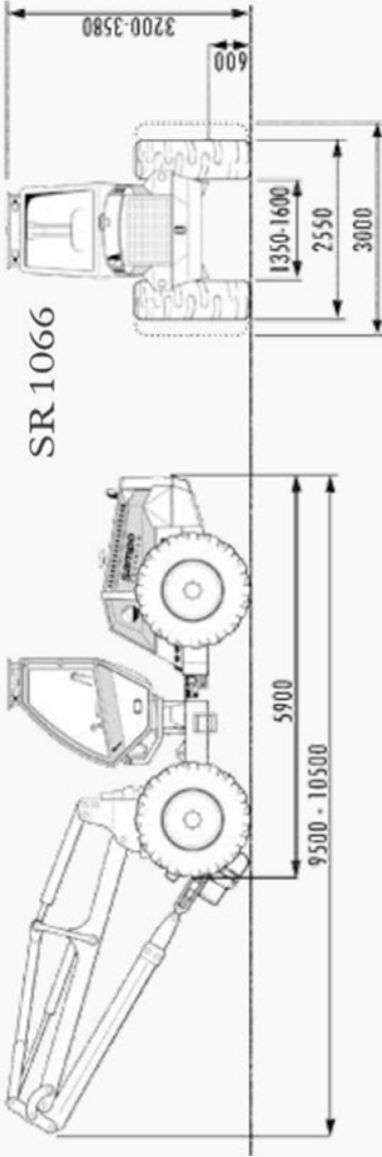
## ALTERNATIVAS CORRESPONDIENTES A LOS CASOS PRÁCTICOS DE LOS APARTADOS 4.3.1 Y 6.2.3


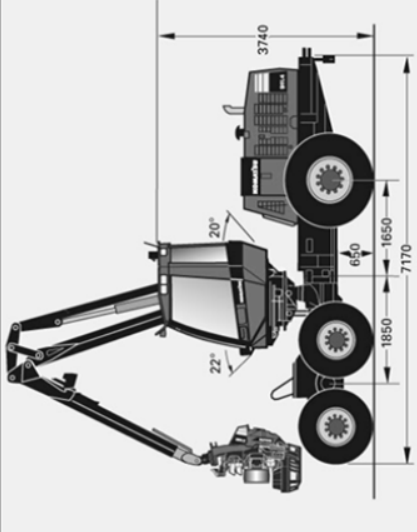
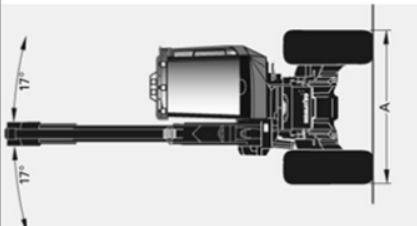
<b>Alternativa 1</b>	
- Grupo de dos motoserristas	
Coste:	Entre 1.800 y 2.600 €/mes (con Seguridad Social asumida por la empresa) por persona con motosierra propia.
Disponibilidad	Variable
Observaciones: Mayor aprovechamiento de la troza basal.	


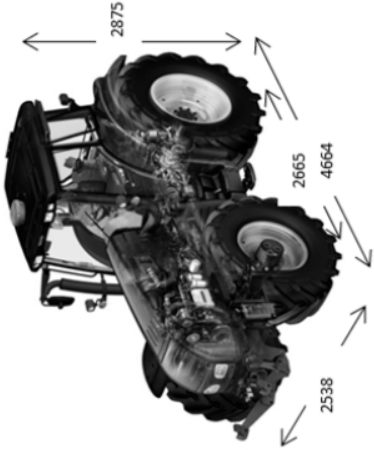



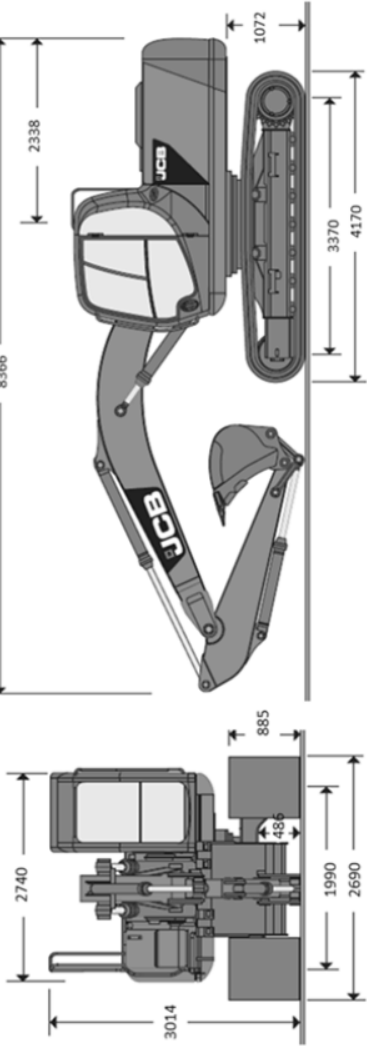
Fuente: [www.stihl.es](http://www.stihl.es)


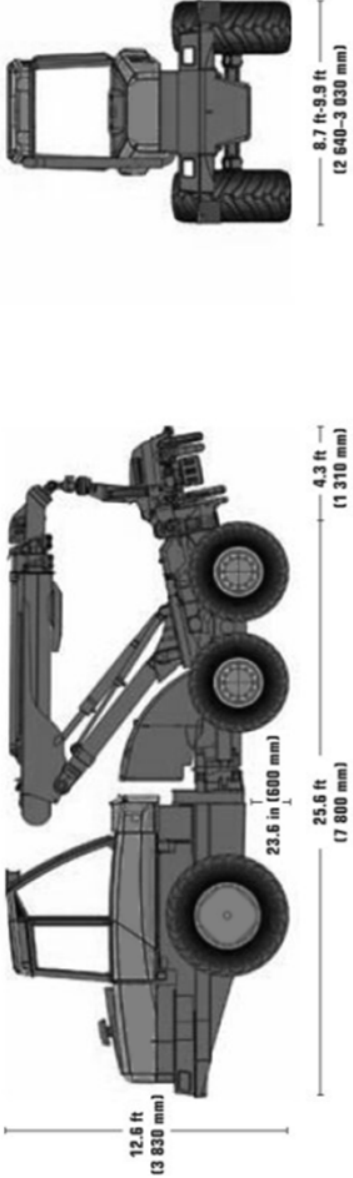
<p><b>Alternativa 2: Sampo Rosenlew 1046 Pro</b></p>	
	<p>0 / 0 (Máquina nueva)</p>
<p><b>Año/Horas de Uso:</b></p>	<p>135 L.</p>
<p><b>Capacidad de depósito</b></p>	<p>100 cv</p>
<p><b>Potencia:</b></p>	<p>Kesla RH18 (Diámetro Max. 42.0 cm)</p>
<p><b>Cabezal</b></p>	<p>Fabricación bajo pedido. 3 meses Aprox.</p>
<p><b>Disponibilidad</b></p>	<p>8.500 kg.</p>
<p><b>Peso</b></p>	<p>250.000 €</p>
<p><b>Precio:</b></p>	<p>Observaciones:</p>
	
<p>Fuente: <a href="http://www.forestalsoft.com">www.forestalsoft.com</a></p>	

<p><b>Alternativa 3: Sampo Rosenlew 1066</b></p>	
	<p><b>Año/Horas de Uso:</b> 0 / 0 (Máquina nueva)</p>
	<p><b>Capacidad de depósito:</b> 330 L.</p>
	<p><b>Potencia:</b> 172 cv</p>
	<p><b>Cabezal:</b> Kesla 25RH (Diámetro Max. 54.0 cm)</p>
	<p><b>Disponibilidad:</b> Fabricación bajo pedido. 3 meses Aprox.</p>
	<p><b>Peso:</b> 13.000 kg.</p>
	<p><b>Precio:</b> 350.000 €</p>
<p><b>Observaciones:</b></p>	
	
<p>Fuente: <a href="http://www.forestsoft.com">www.forestsoft.com</a></p>	

<b>Alternativa 4: Valmet 911.1</b>	
	
	<p>Observaciones:</p>
<b>Año/Horas de Uso:</b>	2003 / 14.400 (Máquina usada)
<b>Capacidad de depósito</b>	370 l.
<b>Potencia:</b>	228 cv
<b>Cabezal</b>	AFM 60 (Diámetro Max. 62.0 cm)
<b>Disponibilidad</b>	Inmediata
<b>Peso</b>	17.300 kg.
<b>Precio:</b>	125.000 €
Fuente: <a href="https://intranet.forestpioneer.com">https://intranet.forestpioneer.com</a>	

<b>Alternativa 5: Valtra 130 + Cabezal</b>		2006 / 2.000
	<b>Año/Horas de Uso:</b>	2006 / 2.000
	<b>Capacidad de deposito</b>	230 l.
	<b>Potencia:</b>	130 cv
	<b>Cabezal</b>	MONRA 600. (Diámetro max. 42 cm)
	<b>Disponibilidad</b>	inmediata
		6.300 kg.
		65.000 €
		Observaciones: Necesarios calzos de apoyo) Alcance 7 m
		Fuente: <a href="http://www.tractorgalicia.es">http://www.tractorgalicia.es</a>

<b>Alternativa 6: Retro Excavadora JCB210 + Cabezal Kesla 20RHS</b>	
	2001 / 10.000
<b>Año/Horas de Uso:</b>	240 l.
<b>Capacidad de deposito</b>	130 cv
<b>Potencia:</b>	Kesla 20RHS (Diámetro Max: 45 cm)
<b>Cabezal</b>	Preparación y homologación: 20 días
<b>Disponibilidad</b>	18.000 kg.
<b>Peso</b>	Maquina base: (33.000 €) + FOPS, ROPS + Cabezal y XTENDER (105.000 €): Total 138.000 €
<b>Precio:</b>	Observaciones: Maquinaria de obras públicas adaptada para uso forestal. Necesaria instalación de cabezal y sistemas de seguridad ROPS y FOPS nuevos para homologación. 8 metros + 2.5 metros (Xtender)
	Fuente: <a href="http://www.tractorgalicia.es">http://www.tractorgalicia.es</a>

<b>Alternativa 7: Ponsse Ergo H73A</b>		17.200
		Año/Horas de Uso:
		Capacidad de deposito
		Potencia:
		Cabezal
		Disponibilidad
		Peso
		Precio:
		Observaciones: alcance 11 m.
155.000 €		Fuente: <a href="https://intranet.forestpioneer.com">https://intranet.forestpioneer.com</a>





**Departamento de Ingeniería Agroforestal**