



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

## **TESIS DOCTORAL**

# **Sistema experto para el análisis de la criticidad y seguridad en redes de galerías de servicios urbanas.**

**Autor: Vicente Calvo Peña**

**Directores de Tesis:**

**Dr. Julián Cantó Perelló, Dr. Jorge Curiel Esparza**

**Universitat Politècnica de València.**

**Departamento de Física Aplicada.**

**Octubre de 2015.**

**A mis amigos Pablo y Patricia.**

---

## Resumen

Los motivos para instalar galerías de servicios son muy variados, siendo el motivo principal la eliminación de los cada vez mayores cortes de servicios públicos e interrupciones en los viales, los cuales causan un gran gasto e interfieren significativamente en el medio ambiente urbano. Como contrapartida, estas instalaciones son, sin duda, un destino atractivo para el sabotaje o vandalismo, ya que contienen todos los servicios públicos esenciales que sirven a las grandes áreas urbanas. Por lo tanto, cuando las galerías de servicios se proyectan y gestionan, es muy importante planificar adecuadamente sus políticas de seguridad de los servicios. Para lograr este objetivo consistentemente, la criticidad y las posibles amenazas se deben de analizar con detalle. Al respecto, se presenta un modelo híbrido cuyo objetivo es diseñar, desarrollar y validar una nueva metodología de toma de decisiones multicriterio (MCDM) para facilitar la toma de decisiones en políticas de seguridad en las galerías de servicios. Así, se ha utilizado para ello tres técnicas: el método Delphi, el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) y el método VIKOR. Con el AHP obtendremos los pesos de la criticidad de las galerías de servicios para cada uno de los posibles impactos y amenazas, sobre la base de datos de expertos obtenidos por el método Delphi combinado con un código de colores. Con el fin de aumentar el consenso en el análisis y resultados de la metodología propuesta, utilizaremos el método VIKOR para obtener un ranking de criticidad de las amenazas. Por último, en esta tesis se presenta un análisis de sensibilidad de los pesos de los impactos y valores de rendimiento de las amenazas.

---

## **Abstract**

The reasons for installing utility tunnels are varied, but the main reason is the elimination of the increasing cuts in public utilities and interruptions vials, which cause great expense and interfere significantly in the urban environment. In return, these facilities are, unquestionably, an attractive destination for sabotage or vandalism, because they contain all the essential public services that serve large urban areas. Therefore, when the utility tunnels are designed and managed, it's very important to properly plan their security policies for services. To achieve this goal consistently, criticality and possible threats should be analyzed in detail. In this regard, a hybrid model is presented, which aims to design, develop and validate a new method of multi-criteria decision making (MCDM) to facilitate decision-making on security policy in the utility tunnels. Thus, three techniques have been used for it, the Delphi method, the Analytic Hierarchy Process (AHP) and the VIKOR method. With the AHP we can get the weights of the criticality of the utility tunnels for each of the possible impacts and threats, based on expert data obtained by the Delphi method combined with a color code. In order to increase the consensus on the analysis and results of the proposed methodology, we will use the VIKOR method to obtain a criticality ranking of threats. Finally, in this thesis it's presented a sensitivity analysis on the impact weights and performance values of the threats.

---

## Resum

Els motius per a instal·lar galeries de servicis són molt variats, sent el motiu principal l'eliminació dels cada vegada majors talls de servicis públics i interrupcions en els vials, els quals causen un gran gasto i interferixen significativament en el medi ambient urbà. Com a contrapartida, estes instal·lacions són, sens dubte, un destí atractiu per al sabotatge o vandalisme, ja que contenen tots els servicis públics essencials que servixen a les grans àrees urbanes. Per tant, quan les galeries de servicis es projecten i gestionen, és molt important planificar adequadament les seues polítiques de seguretat dels servicis. Per a aconseguir este objectiu consistentment, la criticitat i les possibles amenaces s'han d'analitzar amb detall. Respecte d'això, es presenta un model híbrid l'objectiu del qual és dissenyar, desenrotllar i validar una nova metodologia de presa de decisions multicriteri (MCDM) per a facilitar la presa de decisions en polítiques de seguretat en les galeries de servicis. Així, s'ha utilitzat per a això tres tècniques: el mètode Delphi, el Procés Analític Jeràrquic (AHP) i el mètode VIKOR. Amb l'AHP obtindrem els pesos de la criticitat de les galeries de servicis per a cada un dels possibles impactes i amenaces, sobre la base de dades d'experts obtinguts pel mètode Delphi combinat amb un codi de colors. A fi d'augmentar el consens en l'anàlisi i resultats de la metodologia proposada, utilitzarem el mètode VIKOR per a obtenir un rànquing de criticitat de les amenaces. Finalment, en esta tesi es presenta una anàlisi de sensibilitat dels pesos dels impactes i valors de rendiment de les amenaces.



## **ÍNDICE**

---

---

## ÍNDICE

Resumen, Abstract, Resum	3
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	12
CAPÍTULO 2. LA GALERÍA DE SERVICIOS	23
2.1.- Aspectos generales	24
2.2.- Seguridad e Higiene en las galerías de servicio	33
2.2.1.- Riesgos externos	36
2.2.2.- Riesgos inherentes	38
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE DECISIONES MULTICRITERIO	48
3.1.- Fundamentos de la toma de decisiones multicriterio	49
3.1.1.- Introducción	49
3.1.2.- Conceptos básicos sobre el análisis de decisiones	50
3.1.3.- Propósito del análisis de decisiones	50
3.1.4.- El proceso de análisis de decisiones	50
3.2.- Métodos multicriterio para la toma de decisiones	57
3.2.1.- Justificación de la utilización de métodos multicriterio para la seguridad en galerías de servicios	58
3.2.2.- Planteamiento del problema de decisión	59
3.2.3.- Clasificación de los métodos MCDM	59
CAPÍTULO 4. PROPUESTA METODOLÓGICA	77
4.1.- Presentación de la propuesta	78
4.2.- Algoritmo de la metodología	79
4.3.- Definición del problema	79
4.4.- Objetivos	83
4.5.- Planteamiento de alternativas y selección de criterios para la toma de decisiones	86
4.6.- Preferencia de los decisores. Método Delphi	87

---

4.7.- Matriz de decisión	94
4.8.- El proceso analítico jerárquico (AHP) para el análisis de la criticidad en galerías de servicios	96
4.8.1- Establecimiento de las prioridades de los impactos y amenazas	96
4.8.2- Análisis de la criticidad de los impactos mediante matrices de comparación pareadas	101
4.8.3- Clasificación de las amenazas usando matrices de comparaciones pareadas	106
4.9.- VIKOR	108
4.10.- Análisis de sensibilidad	109
4.10.1.- Descripción de los dos principales problemas de análisis de sensibilidad	112
4.10.2.- Problema 1: Determinación del criterio más crítico	113
4.10.3.- Problema 2: Determinación de la medida de rendimiento aij más crítica	117
CAPÍTULO 5. RESULTADOS DE LA APLICACIÓN PRÁCTICA	121
5.1.- Aplicación de la técnica multicriterio AHP	122
5.1.1.- Obtención de la criticidad con respecto a los impactos	123
5.1.2.- Clasificación de las amenazas usando matrices de comparaciones pareadas	128
5.2.- Aplicación del método VIKOR	146
5.3.- Análisis de sensibilidad	149
5.3.1.- Problema 1: determinación del criterio más crítico	149
5.3.2.- Problema 2: Determinación de la medida de rendimiento aij más crítica	155
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES	161
CAPÍTULO 7. REFERENCIAS	165
ANEXOS	178





## **CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN**

---

## **CAPÍTULO 1.- INTRODUCCIÓN.**

Las infraestructuras proporcionan los bienes y servicios que contribuyen a una defensa nacional fuerte y una economía próspera. Además, su sostenida fiabilidad, robustez y resistencia crean un sentido de confianza. También enmarcan nuestra forma de vida y nos permiten disfrutar de un estándar de vida elevado. Cuando pulsamos un interruptor, esperamos luz. Cuando cogemos un teléfono, esperamos un tono de marcado. Cuando abrimos un grifo, esperamos el agua potable. Electricidad, agua potable y telecomunicaciones son sólo algunas de las infraestructuras críticas de los servicios que tendemos a dar por sentado. Ellos han llegado a ser tan básicos en nuestra vida cotidiana que nos damos cuenta sólo cuando, por alguna razón, el servicio se interrumpe. Cuando se produce la interrupción, esperamos razonables explicaciones y una pronta restauración del servicio.

Podríamos clasificar las infraestructuras críticas en los siguientes sectores: Agricultura, Alimentación, Suministro de Agua, Salud Pública, Servicios de emergencia, Gobierno, Industria, Información, Telecomunicaciones, Energía, Transporte, Banca y Finanzas y Servicio postal.

Las infraestructuras críticas son sistemas y activos, ya sean físicos o virtuales, vitales para un país. La incapacidad o destrucción de dichos sistemas y los activos tendrían un impacto debilitante sobre la economía nacional, la salud pública o la seguridad nacional, o cualquier combinación de ellos (The National Strategy for The Physical Protection of Critical Infrastructures and Key Assets, 2013).

La protección de estas infraestructuras ya no solo es una cuestión que preocupa a los gobiernos. Además, los diversos sectores de infraestructura crítica en las economías modernas están tan interconectados e interdependientes que una interrupción de una infraestructura crítica puede perjudicar o afectar negativamente el funcionamiento de varias otras infraestructuras críticas.

Imaginemos como escenario aquel donde la red eléctrica en una región falla debido a un desastre natural o sabotaje. En tal situación, las telecomunicaciones, banca, manufactura, etc. se verían afectados, lo que provocaría graves consecuencias económicas y sociales para la región afectada (Singh et al. 2014).

Los sectores de infraestructura crítica, como el de la agricultura, la alimentación y suministro de agua, junto con la salud pública y los servicios de emergencia, proporcionan los productos de primera necesidad y los servicios de los cuales depende nuestra supervivencia. La energía, el transporte, la banca y los servicios financieros, la fabricación de productos y los servicios postales, sostienen la economía de una nación y hacen posible y disponible una continua formación de bienes y servicios.

Las infraestructuras de la información y de las telecomunicaciones conectan y controlan cada vez más las operaciones de otras infraestructuras críticas.

Las instituciones gubernamentales garantizan la seguridad nacional, la libertad y la gobernanza, así como los servicios que constituyen la red de seguridad pública de una nación.

Las instalaciones, sistemas y funciones que componen las infraestructuras críticas son muy sofisticados y complejos. Consisten en capital humano y físico y sistemas cibernéticos que trabajan juntos en procesos que son altamente interdependientes. Cada uno de ellos abarca una serie de nodos clave que son, a su vez, esenciales para el funcionamiento de las infraestructuras críticas. Para complicar más las cosas, la mayoría de las infraestructuras críticas normalmente están interconectadas y, por lo tanto, dependerán de la continua disponibilidad y funcionamiento de otros sistemas.

Por ejemplo, el comercio electrónico depende de la electricidad, así como de la información y las comunicaciones. Asegurar el servicio eléctrico requiere garantizar los sistemas de distribución y

garantizar el suministro de combustible necesario para generar la energía. Estas interdependencias se han desarrollado con el tiempo y son el producto de procesos operativos innovadores. Dada la naturaleza dinámica de estas infraestructuras interdependientes y el grado en que nuestra vida diaria depende de ellas, un ataque terrorista exitoso para interrumpir o destruirlas podría tener un enorme impacto.

Los terroristas se dirigen a las infraestructuras críticas y los activos clave para lograr efectos que caen en tres categorías generales:

- Efectos directos de la infraestructura: la interrupción en cascada o detención de las funciones de las infraestructuras críticas o activos clave a través de ataques directos a un nodo crítico, sistema o función.

El daño inmediato a las instalaciones y la interrupción de servicios que se debió al ataque de las Torres del World Trade Center, que albergaba activos críticos del sector de servicios financieros, son ejemplos de efectos directos de la infraestructura.

- Efectos indirectos de la infraestructura: interrupción en cascada y las consecuencias financieras para el gobierno, la sociedad, y la economía a través de las reacciones a un ataque.

Desconexión Pública de los viajes aéreos y otras facetas de la economía como resultado de los atentados del 11 de septiembre ejemplifica este efecto. Mitigar las posibles consecuencias de este tipo de ataques requerirá una cuidadosa evaluación de las respuestas políticas y normativas, teniendo en cuenta la psicología de sus impactos, y sopesar adecuadamente los costos y beneficios de acciones específicas en respuesta a ataques a pequeña escala.

- La explosión de infraestructuras: Explosión de elementos de una infraestructura concreta para interrumpir o destruir otro objetivo. El 11 de septiembre, los terroristas explotaron elementos de la infraestructura de la aviación para atacar el World Trade Center y el

Pentágono, los cuales representan la base del poder económico y militar de EE.UU. Determinar las consecuencias potenciales en cascada e intersectoriales de este tipo de ataque es extremadamente difícil.

En los Estados Unidos después de los ataques del 11 de septiembre de 2001, asesores del gobierno se han centrado en la posibilidad de que las infraestructuras críticas de la nación pueden, de hecho, ser vulnerables a los ataques terroristas. La rápida proliferación de sistemas de telecomunicaciones e informáticos, que conectan componentes de una infraestructura con los de otra a través de una compleja red, agrava esta vulnerabilidad (Clark et al., 2011). Este pensamiento ha dominado la planificación de la seguridad del suministro de agua en los Estados Unidos. Por ejemplo, en los Estados Unidos, the Public Health Security and Bioterrorism Preparedness and Response Act of 2002 (US Congress, 2002) ha proporcionado la base para la investigación en seguridad del agua en los Estados Unidos. Homeland Security Presidential Directive 7 (HSPD-7), firmado el 17 de Diciembre de 2003, estableció una política nacional para los departamentos y agencias fedelares para identificar y priorizar infraestructuras críticas y protegerlas de los ataques terroristas (USDHS, 2003). HSPD-7 estableció la Environmental Protection Agency (EPA) como la agencia líder en los Estados Unidos para las actividades de protección de la infraestructura crítica del Sector del Agua. En consecuencia, la USEPA desarrolló una Estrategia de Seguridad Nacional, que se actualiza periódicamente (USEPA, 2013). La intención de la ley es mejorar la seguridad nacional y la protección de la salud humana y el medio ambiente.

La seguridad del agua puede definirse, como un nivel aceptable de riesgos relacionados con el agua para los seres humanos y los ecosistemas, junto con la disponibilidad de agua en cantidad y calidad suficientes para los medios de subsistencia de apoyo, seguridad nacional, la salud humana y los ecosistemas (Bakker, 2012). Un impacto muy importante, pero con frecuencia no reconocido que la gestión de los recursos hídricos y la demanda de

suministro de agua puede tener, es en los ecosistemas (Liu y Yang 2012).

Por lo tanto, es posible caracterizar las amenazas a la seguridad del agua de acuerdo a las amenazas directas a los sistemas de abastecimiento de agua potable, incluyendo amenazas naturales o hechas por el hombre, tales como ataques terroristas (Clark, R. M., 2014). El uso del agua en general se clasifica como sigue: doméstico o urbano, agrícola e industrial. La posibilidad de inyecciones deliberadas tiene el potencial para contaminar el agua dentro del sistema de distribución. Los contaminantes pueden ser agentes químicos (por ejemplo, combustible diesel), virales, bacterias, protozoarios, parásitos y otros agentes no identificados.

Muchos señalan a los ataques terroristas contra la infraestructura crítica energética, como una amenaza particularmente grave para la seguridad energética (Lilliestam, J., 2014). Por ejemplo la Comisión Europea percibe la amenaza terrorista contra la infraestructura energética como "una prioridad" para su programa de protección de infraestructuras críticas (EC, 2006). Las infraestructuras críticas son un objetivo dominante para ataques terroristas (Tranchita et al., 2009), especialmente el sistema de electricidad, que es el más crítico de todos (Van der Vleuten & Lagendijk, 2010).

Por tanto, será un reto identificar, aprovechar y aplicar las lecciones aprendidas para anticiparse y protegerse contra futuros ataques y amenazas en nuestras infraestructuras críticas y activos clave como son las galerías de servicios.

En el capítulo 2 de esta tesis se hará una revisión de las principales características de las galerías de servicios. Las galerías de servicios pueden albergar líneas de energía eléctrica, agua, comunicaciones, líneas de calefacción, gas y otros servicios públicos. Estas galerías pueden ser la respuesta al problema perenne que sufren muchos municipios: cómo acomodar los servicios públicos necesarios, sin la interferencia mutua causada por la operación y mantenimiento de

estos servicios públicos y los viales urbanos (Canto-Perello & Curiel-Esparza, 2009; Fenrick & Getachew, 2012; Rogers et al., 2012).

La mayoría de las galerías de servicios se encuentran en los centros de ciudades en los que la congestión del tráfico es crítica, los servicios públicos son densos, y el coste total de los cortes de servicios públicos y la interferencia del tráfico es grande. Otras galerías de servicios se concentran en las áreas de los campus universitarios, hospitales, complejos de edificios, aeropuertos, centrales nucleares e instalaciones industriales. En este capítulo se hace una distinción y descripción de los dos tipos básicos de componentes en una galería de servicios, es decir, los propios de la galería, y por otro los servicios que canaliza. Dado que una galería de servicio implica un grado de mantenimiento que depende de la peligrosidad del tipo de instalaciones que pueda alojar, así como la propia característica de la construcción subterránea, también se abordará en este capítulo los riesgos externos e inherentes entre otros aspectos.

El capítulo 3 recoge una revisión de los fundamentos que sustentan la teoría de decisión multicriterio. Se tiene como objetivo sentar las bases teóricas que permitan sustentar la propuesta de investigación, la cual se presentará en el capítulo siguiente. Para ello, es necesario conocer los fundamentos que sostienen la teoría de toma de decisiones y una descripción de los métodos más utilizados. La planificación coherente de la seguridad en las galerías de servicios implica la consideración de múltiples factores para satisfacer las necesidades de suministro de una población. El análisis o toma de decisiones intenta ayudar a los individuos a tratar con decisiones difíciles y complejas. La razón, obvia para el estudio del análisis de decisiones, es que la aplicación cuidadosa de sus técnicas conducirá a mejores decisiones. Al descomponer el problema en partes o sub-problemas más elementales, los mismos serán más fáciles de manejar o tratar. La finalidad del análisis o toma de decisiones es que el decisor o grupo de decisores disponga, en todo momento, de la máxima cantidad de información posible, de forma organizada o sistematizada para que desarrolle una mayor y más profunda comprensión del problema, de tal modo que aprenda

sobre el propio problema de decisión y sea capaz de determinar sus preferencias mediante una metodología coherente y transparente, ayudándolo a racionalizar la complejidad del mismo para mejorar la toma de decisiones.

En el capítulo 4 se aporta una metodología estructurada y coherente a la realidad que aplica para facilitar la toma de decisiones en las políticas de seguridad en las galerías de servicio. Para ello, pretendemos que la propuesta permita ofrecer a los decisores mejorar la calidad de las decisiones de una manera fiable. La metodología propone el uso de tres técnicas: el método Delphi, el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) y el método VIKOR. El problema que se pretende resolver desde el punto de vista metodológico implica mejorar la calidad de decisión con relación a tomar las mejores políticas de seguridad teniendo en cuenta un conjunto de amenazas propuestas relativas a las galerías de servicios, basándose en los múltiples criterios (impactos en nuestro problema) y la opinión de diferentes expertos que puedan ayudar al proceso de toma de decisión. El proceso debe ser entendido como un problema de ordenamiento de diferentes alternativas (amenazas en nuestro problema) y criterios (impactos en nuestro caso). Así, con el AHP obtendremos los pesos de la criticidad para cada uno de los posibles impactos y amenazas de las galerías de servicios, sobre la base de datos de expertos obtenidos por el método Delphi combinado con un código de colores. Con el fin de aumentar el consenso en el análisis y resultados de la metodología propuesta, utilizaremos el método VIKOR para obtener un ranking de criticidad de las amenazas.

Inicialmente se identificará y definirá el problema a resolver. Posteriormente se definirá el objetivo que se persigue como resultado de la aplicación del método en las galerías de servicios. Se definirán los criterios y alternativas para elaborar la matriz de decisión, una matriz que permitirá ampliar la información de cada una de las alternativas en función de los criterios considerados en la toma de decisiones. Previamente se habrá procedido a consultar los grupos de expertos para que ponderen la importancia de criterios y alternativas. Para esta consulta, se utilizará el método

Delphi combinado con una escala de colores en las respuestas, basada en el grado de importancia. A continuación se aplicará el método AHP para obtener la ponderación global de los criterios (impactos) y alternativas (amenazas) y finalmente, con el método VIKOR obtendremos un nuevo ranking de soluciones de compromiso.

Por último, se propondrá la realización de un análisis de sensibilidad. En los procesos de toma de decisiones, los pesos asignados a los criterios de decisión intentan representar la verdadera importancia de los criterios. Cuando los criterios no se pueden expresar en términos cuantitativos, entonces es difícil representar con precisión la importancia de estos criterios. En una situación como ésta, el proceso de toma de decisiones se puede mejorar considerablemente mediante la identificación de los criterios críticos y luego volver a evaluar con mayor precisión los pesos de estos criterios. El decisor puede tomar mejores decisiones si puede determinar cómo de crítico es cada criterio. En otras palabras, si sabe cómo la sensibilidad de la clasificación actual de las alternativas cambia según cambian los pesos actuales de los criterios de decisión. En esta tesis abordamos dos problemas de análisis de sensibilidad estrechamente relacionados. En el primero se determina cómo de crítico es cada impacto mediante la realización de un análisis de sensibilidad sobre los pesos de los criterios. Este enfoque de análisis de sensibilidad determina cuál es el cambio más pequeño en las ponderaciones actuales de los criterios que puede alterar la clasificación actual de las amenazas. En el segundo problema, se utiliza un concepto similar para determinar cómo de críticas son las diversas medidas de rendimiento de las alternativas en función de un único criterio de decisión cada vez.

Hasta el presente, tanto AHP como VIKOR y Delphi no se han aplicado en el análisis de criticidad en infraestructuras. Por lo tanto, es necesaria la validación de esta metodología a través de una aplicación real. En el capítulo 5, se ha aplicado la metodología propuesta para el análisis de la criticidad de impactos y amenazas

de las galerías de servicios de la Universidad Politécnica de Valencia.



## **CAPÍTULO 2. LA GALERÍA DE SERVICIOS**

---

## CAPÍTULO 2.- LA GALERÍA DE SERVICIOS

### 2.1.- Aspectos generales

Las galerías de servicios son sistemas de colección de instalaciones urbanas que por sus características y dimensiones, permiten un fácil acceso en cualquier punto de su recorrido, para realizar la instalación, mantenimiento o reparación de las instalaciones que albergan. La galería de servicio se materializa a través de un sistema constructivo que se debe disponer preferentemente bajo las aceras, salvo en casos de falta de espacio o saturación de canalizaciones preexistentes. Su tipología es muy amplia, y sus criterios de clasificación son variados (Imagen 1).



**Imagen 1.-** Galería de servicio visitable.

La experiencia demuestra que el uso de galerías de servicios aumenta la fiabilidad y disminuye el coste de mantenimiento, aumentando la vida efectiva de las instalaciones urbanas. Por otra parte, las galerías de servicios pueden ser inspeccionadas periódicamente para identificar los riesgos de seguridad, y estas operaciones se pueden realizar en todas las condiciones climáticas. Una futura instalación y expansión de los sistemas de servicios públicos se pueden realizar sin excavación cuando se utiliza el sistema de galerías de servicios, eliminando la interrupción del tráfico, reduciendo los costos de mantenimiento de carreteras, y alargando la vida del pavimento (la vida de un pavimento está en proporción inversa al número de aberturas llevadas a cabo) (Canto-Perelló et al., 2008).

La mayoría de las galerías de servicios se encuentran en los centros de ciudades en los que la congestión del tráfico es crítica, los servicios públicos son densos, y el coste total de los cortes de servicios públicos y la interferencia del tráfico es grande. Otras galerías de servicios se concentran en las áreas de los campus universitarios, hospitales, complejos de edificios, aeropuertos, centrales nucleares e instalaciones industriales. Esto es consistente con la primera motivación para las galerías de servicios públicos en el pasado, la eliminación de los cortes de servicios públicos y los resultados de la congestión del tráfico, mejorando la sostenibilidad del medio ambiente y la apariencia estética de la comunidad (Canto-Perelló & Curiel-Esparza, 2006).

Podemos distinguir dos tipos básicos de componentes en una galería de servicios, por un lado estarían los propios a la galería, y por otro los servicios que canaliza. Las principales características y elementos propios que conforman una galería de servicio son:

### **Accesos y corredores:**

Las galerías de servicio mantienen unos corredores conexos y continuos, que garantizan un desplazamiento eficaz si son visitables o un cómodo acceso si son registrables. La tipología de formas en

las secciones de los corredores es muy variada, aunque en nuestros días predomina la sección rectangular. Se disponen, en las galerías visitables, accesos de personal desde el exterior que aproximadamente se sitúan cada 400 m, salidas de emergencia (Imagen 2) y puntos de entrada y salida de materiales, procurando que en todo punto se mantenga la transitabilidad de las personas y no haya estrangulamientos en las secciones destinadas al paso de servicios (Imagen 3).



**Imagen 2.-** Salida de emergencia en galería de servicios.

### **Sistemas de soportación:**

Los sistemas de soportación empleados habitualmente tanto para la sujeción de las instalaciones urbanas como las propias de la galería de servicios, son básicamente las bandejas o ménsulas (electricidad,

telecomunicaciones,...), y las abrazaderas (conductos de agua potable, riego, baldeo,...). Las primeras suelen disponerse en las partes superiores de la sección de la galería, agrupándose tan solo a un lado o a ambos en función del espacio disponible, estas bandejas se apoyan en ménsulas alojadas en regletas (que pueden venir empotradas en las piezas prefabricadas si se emplea este sistema), en algunos casos se prescinde de las bandejas, apoyando las conducciones sobre las ménsulas directamente. Mientras que las últimas se disponen sobre la solera, y a ambos lados si se dispone de espacio, pero siempre permitiendo el paso de personas y materiales con unas mínimas garantías de seguridad (Imagen 4). Pueden aparecer canales especiales en las galerías de servicios, que transporten redes de energía eléctrica de alta tensión, y que por su peligrosidad requieran de un habitáculo resguardado.



**Imagen 3.-** Intersección en galería de servicio, indicada con su código.



**Imagen 4.-** Sistemas de sopotación en galería de servicios.

**Sistema de iluminación:**

La galería debe disponer de un sistema de iluminación general y otro de emergencia. El primero de ellos debe producir un nivel de iluminación medio de al menos 20 lux, empleando luminarias estancas. El sistema de emergencia, debe permitir la evacuación de la galería ante cualquier incidencia, evitando el pánico y la desorientación que podrían producirse en una instalación de este tipo.

**Sistema de ventilación:**

Se debe prever una red de ventilación forzada, compuesta por extractores, que garanticen una correcta renovación de aire y

evacuación de la humedad y calor generados en el interior de la galería de servicios. Si no se disponen conducciones de gas en el interior de la galería, es aconsejable obtener un movimiento de aire superior a 0,2m/s. El aire de ventilación entra o sale de la galería a través de elementos específicos, que con un diseño adecuado pueden formar parte armoniosa del mobiliario urbano, e incluso emplearse para otras funciones como la publicidad.

### **Circuito eléctrico de fuerza:**

Se dispondrán tomas de fuerza a lo largo de la galería, que permitan la conexión de los equipos empleados en el montaje y mantenimiento de las instalaciones urbanas y propias de la galería.

### **Sistema de drenaje:**

El trazado de la galería dispondrá de pendientes que canalicen el agua de infiltraciones o fugas hacia determinados puntos, donde se dispondrá un sistema de bombeo que evacue el agua, a la red de alcantarillado público si el sistema es unitario o a la de pluviales si es separativo. Se deben disponer dispositivos automáticos de control y alerta de los excesos de agua.

### **Sistema de puesta a tierra:**

Todos los elementos metálicos (bandejas, regletas,...) se encontrarán puestos a tierra para evitar el peligro de descargas eléctricas. La disposición de los puntos de tomas a tierra seguirá la reglamentación electrotécnica en vigor.

### **Sistema de agua de baldeo:**

Se dispondrá de un circuito de agua de baldeo, para limpieza y otros usos propios de la galería de servicios (Imagen 5).



**Imagen 5.-** Sistema de agua de baldeo.

**Sistema de protección contra incendios:**

La galería se sectorizará aproximadamente cada 400m, con tabiques que dispondrán de una puerta con sistema antipánico y mirilla, con una resistencia al fuego RF-120. Se dispondrán detectores automáticos conectados con una central de control, que alerten de

incendios, elevación de la temperatura y presencia de gases.

### **Sistemas de señalización:**

Informará de la ubicación urbana, instalaciones urbanas y propias transportadas en cada tramo, accesos, posición de los intercomunicadores, tomas de fuerza y puesta a tierra, vías de evacuación y sistemas de seguridad, así como de cualquier otro elemento que se estime oportuno.

### **Sistemas de intercomunicación:**

El sistema de intercomunicación debe permitir la conexión entre cualquier punto de la galería y el centro de control, el exterior u otro tramo de la red de galerías de servicios. Su utilización es válida tanto para la alerta frente a cualquier riesgo como para labores de mantenimiento o montaje de instalaciones.

### **Sistemas de seguridad frente a intrusión:**

Se dispondrán detectores automáticos y conectados con una central de control que alerten de la utilización indebida de los accesos.

### **Servicios urbanos coleccionados y transportados:**

Los servicios canalizables a través de las galerías de servicios pueden ser variados en dimensiones, número y tipología, pero básicamente se encuentran los siguientes:

Agua potable, agua de riego, aguas residuales, energía eléctrica (alta y baja tensión), calefacción, gas, cables telefónicos, cables de fibra óptica, redes informáticas, servicios municipales (semáforos, alumbrado, etc.).

Entre las principales ventajas que aporta la galería de servicio podemos destacar la supresión de las zanjas y catas que continuamente surgen en el viario público, disminuyendo de esta

forma las molestias al tráfico rodado, evitándose estrangulamientos y peligros.

Otra ventaja es que el uso de galerías de servicios trae consigo un ahorro económico en la explotación de los servicios urbanos. No es necesaria la excavación de zanjas, tan solo aparece el coste de las conducciones y su montaje (Canto-Perelló et al., 2008).

La vida útil de las conducciones de los servicios urbanos enterrados es muy inferior, dada la agresividad del entorno, a la que podemos encontrar en las galerías de servicio, estimándose que en éstas últimas se reducen los daños sufridos en un 90% frente al enterramiento tradicional. En lo referente al mantenimiento e incidencias en las instalaciones urbanas, la galería de servicio permite la realización de un mantenimiento preventivo y predictivo de las infraestructuras, frente al olvido que sufren las canalizaciones enterradas.

En cuanto a las desventajas, debemos citar en primer lugar la difícil gestión que este tipo de infraestructuras plantea, dada la diversidad de instituciones y empresas públicas y privadas que se encuentran involucradas. En cuanto a las instalaciones urbanas que es capaz de conducir la galería de servicio, existen limitaciones respecto a las redes de gas, alcantarillado y calefacción. En el primer caso, la posibilidad de que se produzca un escape, que conlleve posteriormente una explosión, y la elevada magnitud de los daños que se podrían alcanzar tanto en vidas humanas como en la interrupción de los servicios, ha llevado en muchos casos a la exclusión de esta instalación, que es situada habitualmente en un lado exterior a la galería. El alcantarillado presenta problemas con las pendientes que necesita para su funcionamiento y con los caudales que transporta. En cuanto a las tuberías de calefacción, es necesario un correcto diseño y ejecución del aislamiento térmico, de lo contrario puede elevarse de forma progresiva la temperatura en el interior de la galería.

La necesidad de accesos y pozos de aireación cada determinadas distancias (la separación entre accesos no debe ser superior a los 400m) para facilitar el acceso al personal encarece considerablemente el proyecto de la galería de servicio, debido tanto a la realización material de los mismos como a los aumentos de superficie exigidos, frente al enterramiento tradicional.

Otra desventaja, es la facilidad de penetración y sabotaje que presenta la galería de servicio frente a las conducciones enterradas. Esto obliga a extremar las precauciones, disponiendo de elementos de control y limitando la entrada a determinados puntos con los sistemas de vigilancia adecuados. Destacar el sistema de seguridad empleado en las galerías de servicio de Barcelona, que es un ejemplo a seguir en este tipo de infraestructura (Canto-Perelló & Curiel- Esparza, 2013).

## **2.2.- Seguridad e Higiene en las galerías de servicio**

Una galería de servicio implica un grado de mantenimiento que depende de la peligrosidad del tipo de instalaciones que pueda alojar, así como la propia característica de la construcción subterránea. Será por tanto necesario distinguir los riesgos debidos a causas ajenas a los servicios coleccionados en la galería de servicio, a los que llamaremos riesgos externos, de los ocasionados por las instalaciones para las cuales ha sido construida la galería, es decir, inherentes a los servicios, y que llamaremos riesgos inherentes.

Cada construcción del subsuelo tiene unos riesgos específicos identificables. Algunos son obvios, mientras que otros pueden ser encontrados en estándares nacionales o internacionales. Sin embargo, las galerías de servicios no cuentan con una lista de riesgos claramente identificada. Los servicios urbanos son altamente complejos y difíciles de gestionar, además las galerías de servicio tienen características sinérgicas, es decir, la acción simultánea y combinada de cada servicio estando juntos puede conducir a mayores efectos totales que la suma de cada uno por

separado. Esta acción es esencialmente no predecible, incluso dado el conocimiento de las reglas que gobierna cada parte por separado (Cantó & Curiel, 2003).

El objetivo del análisis de riesgo es promover y mantener un ambiente seguro y saludable, especialmente en un lugar de trabajo, proporcionando una gestión del riesgo de calidad. Por un lado, se deben identificar los riesgos o peligros que podrían amenazar la confianza, seguridad, operación y mantenimiento. Por otro lado, es necesario catalogar todas las consecuencias adversas e identificar sus causas.

Las galerías de servicio son un ejemplo particular de un espacio de trabajo confinado (Imagen 6). Por definición, un espacio confinado está diseñado para ocuparlo un empleado de forma no continua. Las galerías de servicio pueden contener conductos de agua potable, líneas de agua para refrigeración, tuberías de aguas recicladas, desagües sanitarios, tuberías de vapor, líneas eléctricas, cables de telecomunicación, cables de señales y en algunos casos servicios de gas.

La sección transversal debe ser diseñada teniendo en cuenta los requerimientos espaciales. Por un lado, se reserva un espacio para servicios según un parámetro espacial dado para cada tipo. En consecuencia, una galería de servicio se diseña para transportar un número determinado de servicios. Por otro lado, las galerías de servicio son accesibles a las personas, y por ello el diseñador debe evitar proporcionar un espacio de servicios sin la apropiada consideración de la accesibilidad a las personas (Canto-Perelló & Curiel-Esparza, 2013). Cuando una ciudad crece, las galerías de servicio deberían ser progresivamente extendidas para servir nuevas áreas y nuevos edificios, especialmente aquellas que son fuertes usuarios de servicios. Sin embargo, el límite del diseño originario no debería ser excedido con servicios adicionales. En una galería saturada de instalaciones es difícil de acceder y en el caso de una emergencia podría ser muy inseguro transitar.



**Imagen 6.-** Espacio de trabajo en una galería de servicio visitable.

Los trabajadores de la construcción están expuestos a una variedad de peligros ergonómicos, incluyendo posturas incómodas, levantar objetos pesados, esfuerzos intensos, vibraciones y movimientos repetitivos (Tak et al. 2011). De igual modo, las galerías de servicio deben diseñarse para minimizar los riesgos para la salud de los operarios. Las posturas inadecuadas y los esfuerzos mecánicos ejercidos por una persona en la realización de una tarea, tales como

elevant una losa o usar una herramienta manual, son dos de las principales causas de problemas músculoesqueléticos. Estos podrían ser reducidos colocando conducciones en estantes, permitiendo de esta forma mantener posturas del torso verticales, además de hacer visibles y alcanzables sus contenidos. Una planificación inteligente de las galerías de servicio debe considerar parámetros ergonómicos para evitar estos riesgos para la salud de los operarios (Calvo et al., 2006).

Los operarios de las galerías de servicio deben de conocer los procedimientos de seguridad a seguir. En una galería de servicio sólo debe entrar personal cualificado, vestido con el adecuado equipo de protección y nunca se debe entrar solo, alguien debería siempre permanecer fuera y llevar las mismas ropas de protección. El operario auxiliar nunca debería entrar a la galería sin su propio auxiliar y sólo después de avisar a la autoridad de emergencia. Más de la mitad de los trabajadores que han fallecido en un espacio confinado estaban intentando rescatar a sus compañeros (Calvo et al., 2006).

Las operaciones en las galerías de servicio para la renovación o adición de nuevos servicios incrementa la contaminación por la difusión de pequeñas partículas, gases tóxicos y otras sustancias peligrosas. Estas sustancias potencialmente peligrosas deberían extraerse de la galería de servicio y los trabajadores deberían de comprobar el oxígeno del aire del interior de la galería, su toxicidad y combustibilidad antes de entrar.

### **2.2.1.- Riesgos externos**

#### **a) Entrada de gas proveniente de conductos externos:**

Se trata de sucesos ocasionales, ya que pueden ocurrir solamente en caso de rotura de algún conducto de gas. Esto puede conducir a una explosión, incendio, asfixia o envenenamiento del personal que trabaja en el interior de las galerías de servicios. Por tanto se han de adoptar medidas preventivas para la seguridad frente a daños

personales y construcciones portantes. Estas medidas podrían consistir en la impermeabilización o sustitución de estos conductos de gas externos y, además, o si las medidas anteriores no fuesen posibles, se debería realizar una impermeabilización de conductos y galerías, dotando también a éstas de un sistema de aireación natural o forzada, así como la compartimentalización de las mismas como medida preventiva para la propagación del fuego. Sin embargo, estas medidas no eximen de una adecuada vigilancia de la galería de servicio, realizando mediciones de la concentración de gas antes de entrar, así como un control periódico de las mismas.

### **b) Inundación por entrada de agua externa**

Se trata también de un suceso ocasional, cuyos efectos podrían derivar al ahogamiento de personas, así como a daños en las construcciones. Este tipo de riesgos hacen que se deban también plantearse una serie de medidas preventivas, para tener, además, una mayor garantía en la seguridad de los suministros que proporcionan las instalaciones que recogen las galerías de servicio. Será por tanto conveniente una protección frente a elevaciones exteriores del nivel máximo de agua. La galería debe estar provista de puntos de evacuación, anclajes en todas las conducciones, así como de sistemas de achique. También se debe hacer una vigilancia de estos sucesos a través de sistemas de alarma.

### **c) Inestabilidad de los cimientos**

Los pequeños desplazamientos ocasionados por la inestabilidad de los cimientos pueden dar lugar a la rotura de conducciones en el interior de la galería. Lo que podría ocasionar una inundación por rotura de alguna conducción de agua o un escape de gas si la galería alojase este servicio, ocasionando una explosión. También hay que considerar las posibles roturas de los cables eléctricos y las consecuencias que de ello se derivan. Por tanto serán necesarias medidas destinadas a la seguridad frente a daños personales y construcciones portantes. Para ello se han de rehabilitar los

cimientos, colocar anclajes móviles y realizar ciertas inspecciones técnicas.

#### **d) Terremotos**

Este suceso da lugar a la rotura de conducciones, al igual que ocurre con la inestabilidad de los cimientos. El grado de este tipo de riesgo dependerá de la zona donde se encuentre la galería de servicio. Para garantizar los servicios de todas las conducciones sería conveniente instalar anclajes resistentes a movimientos sísmicos, así como de una puesta en obra específica de los conductos.

#### **e) Situación bélica**

En caso de guerra existe una elevada posibilidad de graves daños materiales, ocasionando entre otros daños la rotura de conducciones. Se pretende ante estas situaciones garantizar al máximo el servicio de todas las conducciones, tomando como medidas preventivas la utilización de anclajes resistentes a impactos, así como la puesta en obra específica de los conductos.

#### **f) Sabotaje**

En el interior de las galerías de servicios pueden producirse actos terroristas, con la consiguiente rotura de conducciones, explosiones e incendios. Para garantizar el servicio, como medidas preventivas a estos sucesos ocasionales se ha de limitar el acceso a las galerías.

### **2.2.2.- Riesgos inherentes**

#### **a) Riesgos de las líneas eléctricas**

Las líneas eléctricas son siempre peligros potenciales, incluyendo aquellas utilizadas en los circuitos de iluminación. Un sistema de aislamiento a lo largo de los lados de la galería de servicio puede proteger a los operarios de daños debidos a los contactos con las

líneas eléctricas. Si fuera posible, las líneas eléctricas deberían desconectarse antes de realizar cualquier tarea. Solamente se deben usar luces, herramientas y equipos eléctricos seguros, con toma de tierra y a prueba de explosión.

Los cables eléctricos son el principal elemento combustible en las galerías de servicio, incluso más que cualquier servicio de gas. Los fuegos en las galerías de servicio son difíciles de controlar, debido al denso humo negro de la combustión de los cables y además, el personal encargado de su extinción es reticente a derramar agua ciegamente cuando existen cables de alta tensión. Normalmente, el aislante de estos cables está hecho con goma de etileno propileno recubiertos con polietileno clorosulfonado. El polietileno clorosulfonado produce un retraso de la combustión. Sin embargo un fuego en una galería de servicio genera un espeso humo negro, dando lugar a gases venenosos y agresivos, siendo la causa del envenenamiento de las personas y de los daños en conducciones y elementos metálicos. Este problema puede ser reducido usando en los cables recubrimientos no halogenados.

La ventilación de las galerías deberá ser suficiente para asegurar que el aire se renueve 6 veces por hora, para evitar acumulaciones de gas y condensaciones de humedad, y contribuir a que la temperatura máxima de la galería sea compatible con los servicios que contenga. Esta temperatura no sobrepasará los 40 °C.

Las galerías visitables se usarán, preferentemente, para instalaciones eléctricas de potencia, cables de control y telecomunicaciones. En ningún caso podrán coexistir en la misma galería instalaciones eléctricas e instalaciones de gas. Tampoco es recomendable que existan canalizaciones de agua aunque en aquellos casos en que sea necesario, las canalizaciones de agua se situarán a un nivel inferior que el resto de las instalaciones, siendo condición indispensable, que la galería tenga un desagüe situado por encima de la cota del alcantarillado, o de la canalización de saneamiento en que evacua.

Los cables se dispondrán de forma que su trazado sea recto y procurando conservar su posición relativa con los demás. Las entradas y salidas de los cables en las galerías se harán de forma que no dificulten ni el mantenimiento de los cables existentes ni la instalación de nuevos cables. Una vez instalados, todos los cables deberán quedar debidamente señalizados e identificados. En la identificación figurará, también, la empresa a quién pertenecen.

Los cables deberán estar fijados a las paredes o a estructuras de la galería mediante elementos de sujeción (regletas, ménsulas, bandejas, bridas, etc.) para evitar que los esfuerzos electrodinámicos que pueden presentarse durante la explotación de las redes de baja tensión, puedan moverlos o deformarlos, ver Imagen 7.

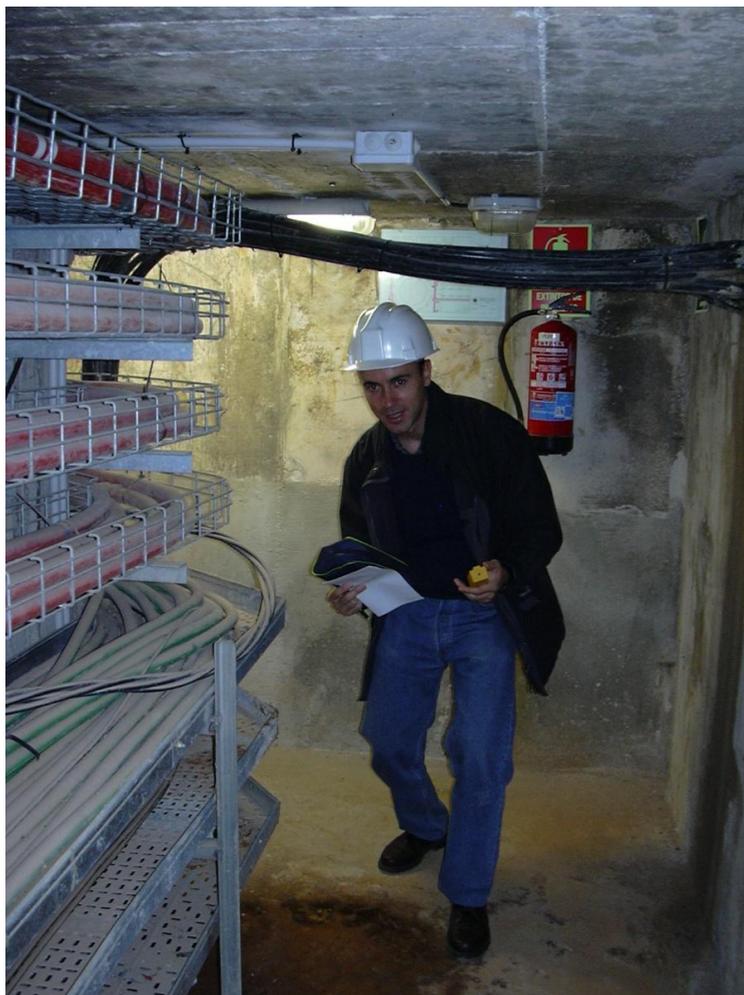
Todos los elementos metálicos para sujeción de los cables (bandejas, soportes, bridas, etc.) u otros elementos metálicos accesibles a las personas que transitan por las galerías (pavimentos, barandillas, estructuras o tuberías metálicas, etc.) se conectarán eléctricamente al conductor de tierra de la galería (Calvo et al., 2006).

En relación con las líneas eléctricas, también podemos hablar de los posibles riesgos para la salud de los trabajadores de las galerías de servicios debidos a las exposiciones a campos electromagnéticos. Algunos estudios epidemiológicos tanto ocupacionales como no ocupacionales han encontrado asociaciones positivas entre las exposiciones a CEM y enfermedades tales como el cáncer y desórdenes reproductivos y neurológicos. El análisis de los efectos para la salud se ha visto impedido por la escasez de datos sobre las exposiciones a CEM, así como por una inadecuada comprensión de por qué los humanos y otros sistemas vivos no pueden ser sensibles a tales exposiciones. Se debería por tanto estimar la exposición a campos electromagnéticos del trabajador (Imagen 8). Esta estimación puede conseguirse mediante una estrategia que lleve a la monitorización individual, de forma que se puedan medir las exposiciones durante un período considerado.



**Imagen 7.-** Líneas eléctricas en galería de servicio de la UPV.

Tras realizar mediciones en algunas galerías de servicios, tales como en las de la Universidad Politécnica de Valencia, no se ha registrado un solo valor de las magnitudes medidas que supere los niveles de referencia propuestos por la Comisión Internacional de Protección a la Radiación No-Ionizante (ICNIRP), en su guía para limitar la exposición a CEM (campos electromagnéticos) alternos (Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields, up to 300 GHz). El valor más alto registrado no supera el 8,4% de estos niveles, por lo que no resulta establecer medidas adicionales, más que, en su caso, señalar el tipo de riesgo al que se está expuesto. De estos valores registrados, no se deduce, de acuerdo al estado actual del conocimiento, un riesgo de exposición indebido a radiaciones electromagnéticas (Calvo-Peña et al., 2009).



**Imagen 8.-** Medición de la exposición de CEM debido a los cables eléctricos en la galería de servicio.

### **b) Riesgos debidos a las conducciones de gas**

Existe el riesgo de explosión como consecuencia de fugas, aunque no es frecuente este tipo de suceso, pero si ocurre puede ocasionar graves daños personales y materiales, como roturas de conductos y

daños en la galería. Para evitar este suceso se deben tomar medidas tales como el empleo de conductos de primera calidad con uniones soldadas, procurar que la galería cuente con un sistema de aireación natural o forzada, llevar a cabo la compartimentalización de la galería, siendo además conveniente la realización del control periódico de la estanqueidad de las conducciones, del grado de corrosión de los conductos, de la concentración de gas tanto de forma periódica como antes de entrar a la galería.

### **c) Riesgos de las conducciones de agua**

La inundación de la galería por rotura de una conducción es un suceso ocasional que puede provocar daños a personas por ahogamiento y leves daños materiales, por daños en las conducciones. Por tanto será necesario establecer como objetivo, la seguridad frente a personas y construcciones portantes.

La inundación de una galería de servicio es uno de los obstáculos principales que el personal de rescate continúa encontrándose. Un sistema de protección a la inundación normalmente consiste en una variedad de estrategias empleadas en diferentes escenarios, entre las que permiten inundaciones ocasionales pero de reducida cantidad de daño, hasta sistemas de drenaje combinadas con bombas. Normalmente se desarrolla un grupo de estrategias alternativas y cada una es evaluada para determinar el beneficio neto (la diferencia entre el beneficio del proyecto y el coste). El beneficio de un sistema de reducción de la inundación está basado en cuánto se espera reducir el futuro daño de inundación, de esta forma se establece la estrategia que es más económica en términos de su ratio beneficio.

Medidas preventivas como contar con anclajes resistentes, sistemas automáticos de corte, así como sistemas adecuados de achique, no deberían eximir de una adecuada vigilancia, realizando por tanto controles periódicos de las conducciones, y del grado de corrosión de los conductos, además de establecer un sistema de alarma.

#### **d) Riesgos de las conducciones de agua caliente**

La fuga de vapor de agua caliente por la rotura de una conducción es un suceso ocasional que puede ocasionar daños a personas, así como daños en las conducciones por efecto del calor. Esto exige que se tomen medidas preventivas como la colocación esmerada de conductos, sistemas ubicados en los extremos de las galerías accionables desde el exterior que permitan el corte, así como sistemas de alarma.

Puede parecer que el único riesgo de estas líneas sea un escape de vapor, pero los hechos son que estas líneas durante muchos años fueron hechas de materiales que contienen asbestos.

Asbesto es el nombre de un grupo de minerales de origen natural que se encuentran en varios productos, como en los aislantes de conducciones, tuberías, cables eléctricos y cementos, con el fin de resistir el calor y la corrosión. La inhalación de fibras de asbestos por los trabajadores puede provocar enfermedades en los pulmones y en otros órganos que pueden no aparecer hasta años después de ocurrir la exposición. Por ejemplo, la asbestosis puede generar una acumulación de tejido cicatricial en los pulmones resultando en la pérdida de la función pulmonar, discapacidad y muerte. La exposición ocurre cuando los trabajadores mueven materiales que contienen asbestos durante la modificación, reparación o renovación de instalaciones o bien cuando los trabajadores de mantenimiento están en contacto con materiales deteriorados que contienen asbestos.

La Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA) ha establecido normas para proteger a los trabajadores de exposición al asbestos en el lugar de trabajo.

#### **e) Los sistemas de alcantarillado en las galerías de servicio**

Hay muchos problemas de salud en el lugar de trabajo relacionados con el uso de las galerías de servicio como sistemas de alcantarillado.

En primer lugar, la atmósfera puede de repente e impredeciblemente convertirse en letalmente peligrosa (tóxica, inflamable o explosiva) por causas más allá del control de los operarios. Segundo, un lugar donde la suciedad o el agua está estancada o que presenta una alta humedad, como es el caso en los sistemas de desagüe, son un buen medio para el crecimiento de los microorganismos. Por último, otro problema es la inundación, no sólo para los operarios sino también para otros servicios tales como cables, tuberías o líneas de agua.

Estos problemas pueden requerir el uso de equipamiento especial. Este equipamiento podría incluir aparatos de monitorización atmosféricos con alarmas automáticas, aparatos de respiración, luces impermeables, etc. Todo este equipamiento es probable que afecte la eficiencia de alguna tarea en un espacio de trabajo confinado de una galería de servicio y, consecuentemente hace que se deban incrementar los requerimientos de espacio para las tareas de los operarios.

Por tanto, la separación entre las redes de las galerías de servicio y los sistemas de drenaje parece ser una elección de diseño esencial. Si su inclusión es inevitable, los conductos del alcantarillado deben aislarse apropiadamente en el interior de las galerías de servicio para minimizar los riesgos potenciales previamente definidos. Además, si el sistema de alcantarillado está incluido en el interior de la galería de servicio, las aguas negras y blancas deberían estar completamente separadas.

#### **f) Peligros potenciales de las líneas de agua de refrigeración**

En los alrededores de las líneas de agua para refrigeración están presentes el monóxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, hidrocarburos, además de haber una deficiencia de oxígeno. No obstante, la calidad del aire de la galería de servicio puede ser prácticamente normal con concentraciones de contaminantes por debajo de los valores establecidos, lo que no exime que los operarios de las galerías de servicio estén advertidos de los peligros

potenciales de estos gases. En adición a estos gases asociados con el agua para refrigeración, los operarios deben tomar precauciones debido a la presencia de microorganismos (*Legionella pneumophila*, bacteria conocida como la causa de la epidemia de legionela). Cualquier contacto directo con el agua de refrigeración o la respiración de aerosoles debe minimizarse (Curiel & Cantó, 2005).

Los operarios potencialmente expuestos a los gases de escape deberían:

- i. Llevar un medidor multi-gas durante las operaciones de ventilación.
- ii. Llevar gafas de seguridad para prevenir la exposición de los ojos al líquido o aerosol.
- iii. Llevar apropiada protección de respiración.
- iv. Lavarse las manos y todas las partes del cuerpo expuestas al finalizar alguna tarea.



**CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE DECISIONES  
MULTICRITERIO**

---

## **CAPÍTULO 3.- ANÁLISIS DE DECISIONES MULTICRITERIO**

En este capítulo se hace una recopilación sobre el estado del conocimiento de los fundamentos y aplicaciones de las técnicas de análisis de decisiones multicriterio. Se tiene como objetivo sentar las bases teóricas que permitan sustentar la propuesta de investigación, la cual se presentará en el capítulo siguiente. Para ello, es necesario conocer los fundamentos que sostienen la teoría de toma de decisiones y una descripción de los métodos más utilizados. Finalmente, se propone el método multicriterio que se utilizará para la toma de decisiones.

### **3.1.- Fundamentos de la toma de decisiones multicriterio**

#### **3.1.1.- Introducción**

La planificación coherente de la seguridad en las galerías de servicios implica la consideración de múltiples factores para satisfacer las necesidades de suministro de una población.

El análisis o toma de decisiones intenta ayudar a los individuos a tratar con decisiones difíciles y complejas, y a su vez es un enfoque prescriptivo diseñado para individuos normalmente inteligentes que desean pensar con intensidad y profundizar en problemas reales importantes (Keeney & Raiffa, 1993). La razón, obvia para el estudio del análisis de decisiones, es que la aplicación cuidadosa de sus técnicas conducirá a mejores decisiones. No se debe confundir una buena decisión con un buen resultado. La primera se hace a partir del entendimiento y estudio detallado y cuidadoso del problema. En efecto, es posible tomar buenas decisiones y tener malos resultados, pues el análisis de decisiones no puede mejorar la suerte de los individuos, en todo caso puede ayudar a mejorar la comprensión del problema y conducir a tomar mejores decisiones (Ríos et al. 2002).

Vista la complejidad en el proceso de tomar decisiones en un ambiente multidimensional, conviene plantearnos: ¿Cómo puede ayudarnos el análisis de decisión? La respuesta es sencilla, “divides y vencerás”. Al descomponer el problema en partes o sub-problemas más elementales, los mismos serán más fáciles de manejar o tratar.

Después, cada sub-problema se estudia aisladamente y el análisis de decisiones proporciona el mecanismo formal para integrar los diferentes resultados, de modo que resulte posible la elección por parte del decisor, de una alternativa o acción (Ríos et al. 2002).

Cabe destacar que los juicios personales que emiten el decisor o grupo de decisores representan una parte fundamental del proceso de análisis de decisión. Al respecto, la investigación de operaciones no toma en cuenta tales juicios subjetivos, sino que generan decisiones óptimas en base a entradas objetivas. En contraste, el análisis de decisiones permite la inclusión de juicios subjetivos como un aspecto crucial para la toma de buenas decisiones, debiendo de ser tales juicios claros y explícitos.

El análisis de decisiones, además de facilitar la selección de la mejor alternativa, también puede proporcionar otras ventajas y beneficios debido a la profundización en el tratamiento de los problemas. El pensamiento creativo en que se apoya puede conducir a generar nuevas alternativas mejores que las inicialmente planteadas o a motivar la necesidad de nueva información previamente a la elección final (Ríos et al. 2002).

En resumen, la finalidad del análisis o toma de decisiones es que el decisor o grupo de decisores disponga, en todo momento, de la máxima cantidad de información posible, de forma organizada o sistematizada para que desarrolle una mayor y más profunda comprensión del problema, de tal modo que aprenda sobre el propio problema de decisión y sea capaz de determinar sus preferencias mediante una metodología coherente y transparente, ayudándolo a racionalizar la complejidad del mismo para mejorar la toma de decisiones.

### **3.1.2.- Conceptos básicos sobre el análisis de decisiones**

Este apartado trata de ilustrar los conceptos que suelen ser utilizados en el análisis o toma de decisiones, con el propósito de facilitar la comprensión de los siguientes contenidos desarrollados en esta tesis.

### **3.1.2.1.- Decisor o unidad decisora**

El decisor o unidad decisora corresponde al individuo o conjunto de individuos que tienen la responsabilidad de tomar la decisión (Ríos et al. 2002).

### **3.1.2.2.- Analista**

Es la persona que modela la situación concreta y que eventualmente, hace las recomendaciones relativas a la selección final. El analista no expresa opiniones personales, sino que se limita a reconocer las del decisor y a tratarlas de la manera más objetiva posible. Con relativa frecuencia, es común que el decisor intente reemplazar al analista por un programa de ordenador. Sin embargo, la máquina no puede ofrecer más que un modelo predefinido, por lo que todo el peso del analista recae sobre los hombros del decisor: el ordenador es solamente un soporte para la formalización, la memorización y la reflexión (García, 2009).

### **3.1.2.3.- Ambiente o contexto de la situación de decisión**

Todo proceso de decisión transcurre en un contexto que se denomina ambiente o entorno. El conjunto de características que definen perfectamente la situación de decisión respecto al entorno se denomina estado del ambiente o de la naturaleza (Ríos et al., 1989). Por otra parte, los parámetros que definen el contexto de decisión pueden estar asociados a diversos aspectos tales como fiscales, legislativos o culturales, los cuales pueden ampliar o restringir el alcance del análisis e imponer restricciones en el proceso de toma de decisiones. Igualmente si todos los elementos son los mismos, la solución del problema puede ser diferente si la decisión es tomada en otro lugar o periodo de tiempo (Diakoulakis & Grafakos, 2004).

### **3.1.2.4.- Criterios: objetivos, atributos y metas**

Los criterios de decisión  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$  donde  $C_j$  ( $j = 1, \dots, n$ ) constituyen los puntos de vista o parámetros que se utilizan para manifestar las preferencias del decisor. Así mismo, son elementos

de referencia en base a los cuales se realiza la decisión (Peris et al., 2002). En la mayor parte de problemas de decisión multicriterio es difícil establecer estos criterios de decisión, no obstante su determinación resulta un paso esencial del proceso.

Los criterios pueden representar diferentes aspectos, tales como objetivos, metas, valores de referencia, niveles de aspiración o utilidad (Flament, 1999).

### **3.1.2.5.- Alternativas**

Las alternativas constituyen el conjunto de posibles opciones definidas sobre las que la unidad decisora toma una decisión. El conjunto de alternativas puede ser continuo (no numerable) o discreto (numerable). En el segundo caso el conjunto de alternativas se designa por  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ , donde  $A_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) son cada una de las alternativas posibles.

Salvo que se indique lo contrario, se supondrá que las alternativas son diferentes, excluyentes y exhaustivas (Peris et al., 2002). Las alternativas son diferentes porque están definidas de tal forma que cada alternativa es claramente diferenciable del resto. Las alternativas son excluyentes porque la elección de una de ellas imposibilita la elección de cualquier otra, lo que implica que no le está permitido al decisor tomar alternativas intermedias que resulten de la combinación de otras. Finalmente, las alternativas son exhaustivas porque, definido el conjunto inicial de alternativas, este constituye el universo de decisión, lo que supone que si el decisor introduce una nueva alternativa al conjunto es preciso volver a comenzar el análisis con el nuevo conjunto así definido.

### **3.1.2.6.- Pesos o estimación de las preferencias**

Los pesos o ponderaciones son las medidas de la importancia relativa que los criterios tienen para el decisor. Asociado a los criterios, se asigna un vector de pesos  $w = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ , siendo  $n$  el número de criterios. En los problemas de toma de decisión multicriterio es muy frecuente que los criterios tengan distinta relevancia para el decisor, aunque esto no significa que los criterios

menos importantes no deban ser considerados. Estas diferencias justifican la existencia de los pesos asociados a los criterios.

Los métodos más utilizados para la asignación de pesos o estimaciones de preferencia son:

- *Métodos de asignación directa:* aquel en el que el decisor asigna directamente valores a los pesos. Se pueden asignar de diferentes formas: por ordenación simple, por tasación simple o por comparaciones sucesivas. El método de tasación simple, por ejemplo consiste en pedir al decisor que dé una valoración de cada peso en una cierta escala; una vez obtenidas las valoraciones, estas se normalizan dividiendo cada valor por la suma de todos ellos.
- *Método del auto-vector:* En este método los pesos asociados a cada criterio son las componentes del auto-vector asociado al auto-valor dominante de una matriz de comparaciones por pares entre los criterios.

### 3.1.2.7.- Matriz de decisión

Una vez obtenidos los pesos de los criterios, con la matriz de decisión se recogen los pesos o preferencias  $x_{ij}$  del decisor para cada alternativa  $A_i$  con respecto a cada criterio  $C_j$ , Tabla 1.

**Tabla 1.-** Matriz de decisión.

	$W_1$	$W_2$	...	$W_n$
	$C_1$	$C_2$	...	$C_n$
$A_1$	$X_{11}$	$X_{12}$	...	$X_{1n}$
$A_2$	$X_{21}$	$X_{22}$	...	$X_{2n}$
$A_m$	$X_{m1}$	$X_{m2}$	...	$X_{mn}$

### **3.1.3.- Propósito del análisis de decisiones**

En el proceso de toma de decisiones, el análisis multicriterio constituye un soporte para poder elegir de forma racional y sistemática una alternativa entre varias. Así, un grupo de decisores son los que finalmente eligen entre varias alternativas, usando para ello dos o más criterios. En la mayoría de casos no hay una alternativa que sea mejor que las otras respecto a cada criterio. La solución es altamente dependiente a las preferencias de los decisores, preferencias que generalmente se llevan a cabo a través de la ponderación de factores (Polatidis & Haralambopoulos, 2001).

Se denota por MCDM (Toma de Decisiones Multicriterio, siglas en inglés) como término genérico para referirse a todos los métodos multicriterio que existen para la toma de decisiones. Usando MCDM se puede fragmentar un problema complejo en piezas menos complejas, luego las piezas son re-ensambladas al estado inicial por los decisores (Loken, 2007).

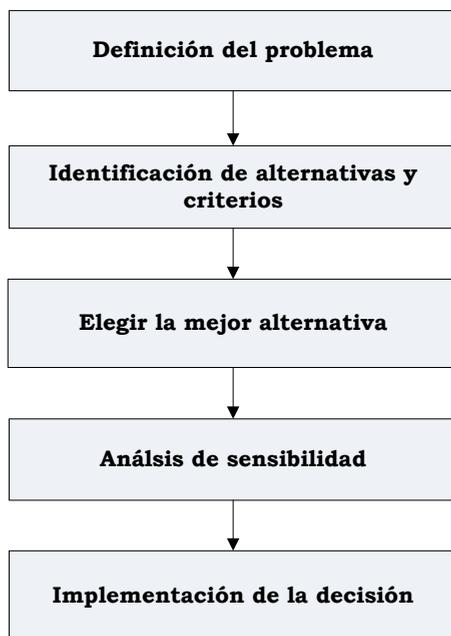
### **3.1.4.- El proceso de análisis de decisiones**

En todo análisis de decisiones se pueden distinguir dos fases: una cualitativa y otra cuantitativa; la primera fase incluye la identificación del problema hasta su estructuración; mientras que la fase (cuantitativa) corresponde a la asignación de entradas numéricas y la evaluación del problema, (Ríos et al., 2002).

El análisis cualitativo se basa fundamentalmente en el razonamiento y experiencia del decisor; incluye la impresión intuitiva que el decisor tiene del problema. Por el contrario, en el análisis cuantitativo, el analista se concentra en los hechos o datos asociados al problema y desarrolla expresiones matemáticas que describen los objetivos, restricciones y las relaciones existentes en el problema. Posteriormente, el analista ofrece una recomendación con base en los aspectos numéricos del problema.

Para plantear el problema de toma de decisiones deberíamos abordar las siguientes etapas: definición del problema, identificación de alternativas y criterios, modelización del problema,

elección de la mejor alternativa, análisis de sensibilidad e implementación de la decisión, ver Figura 1.



**Figura 1.-** Diagrama de flujo del proceso de análisis de decisiones.

#### **3.1.4.1.- Definición del problema**

Es la etapa inicial que debe llevarse a cabo cuidadosamente para evitar una identificación errónea del problema. Hay que tener en cuenta que si el problema no se identifica correctamente, el objetivo será erróneo y por ende la solución no será la adecuada.

#### **3.1.4.2.- Identificación de alternativas y criterios**

Tal como se ha comentado anteriormente, las alternativas son las posibles soluciones al problema de decisión, entre las cuales el decisor puede elegir. Los criterios son los parámetros que permiten reflejar las preferencias del decisor respecto a un atributo. Los

criterios pueden presentarse de dos formas, criterios cuantitativos (evaluaciones numéricas) y cualitativos (no existe una unidad de medida, la medida es subjetiva).

### **3.1.4.3.- Modelización del problema**

Esta etapa constituye uno de los aspectos fundamentales del análisis de decisiones. La modelización sigue la idea de dividir y descomponer el problema en partes más pequeñas para hacerlo más manejable, comprender mejor sus estructuras y estimar o deducir las incertidumbres y los valores de preferencia.

Con la estructuración del problema finaliza el análisis cualitativo, el cual representa una aproximación al modelo inicial de decisión, que consistirá en una descripción cualitativa de relaciones entre algunas variables o criterios de decisión. Los modelos de decisión contendrán un conjunto de variables representativas del sistema o problema en estudio, que describirán su medio o contexto y los efectos de las decisiones, relaciones estructurales entre las variables y las preferencias respecto a los resultados de las posibles acciones. Una parte importante del proceso de construcción de un modelo será la determinación de las variables relevantes y la modelización de las relaciones entre ellas, así como los objetivos que utilizará el decisor o decisores para medir su deseabilidad respecto a las posibles consecuencias de las alternativas consideradas (Ríos et al., 2002). En esta parte, también es imprescindible la identificación de los posibles agentes de decisión.

Finalmente, el decisor o grupo de decisores asignaran sus valores de preferencia para los distintos criterios que permitirán establecer las comparaciones numéricas entre las alternativas.

### **3.1.4.4.- Elección de la mejor alternativa**

Consiste en identificar la mejor alternativa según las preferencias del decisor o grupo de decisores. En general, se obtiene un ranking de soluciones compromiso, de cuyo conjunto se obtiene una alternativa que obtiene la mejor clasificación sobre las demás.

### **3.1.4.5.- Análisis de sensibilidad**

Es un complemento necesario de cualquier modelo cuantitativo y más aún en el caso de un proceso iterativo, como es el análisis de decisiones. Mediante este complemento el analista puede variar los datos de entrada para observar el efecto que se produce en los datos de salida. Si pequeños cambios en las entradas producen efectos significativos en las salidas, el decisor debería reflexionar sobre los juicios emitidos y asegurarse de que los valores usados representen fielmente sus opiniones y preferencias. Sin embargo, si los efectos son de poca importancia cuando se realizan las variaciones, el decisor no debe preocuparse de reasignar sus opiniones y preferencias.

En Ríos et al. [2002], el análisis de sensibilidad dentro del análisis de decisiones puede verse desde diferentes perspectivas tales como técnica, cognoscitiva y de grupo. Técnicamente, el análisis de sensibilidad ayuda al analista a planificar el análisis para evitar cálculos innecesarios sin perder fiabilidad. Cognoscitivamente, el decisor aprende sobre sus juicios descubriendo la importancia que representa para él, cada uno de ellos. Por último, los grupos pueden realizar análisis de sensibilidad sobre los parámetros con los que están en desacuerdo y centrar toda su atención en los más importantes.

Finalmente, al tener la alternativa más favorable se procede a su ejecución.

### **3.2.- Métodos multicriterio para la toma de decisiones**

Hay diversos métodos MCDM, los cuales difieren en muchas áreas, antecedentes teóricos, método de cálculo y tipo de resultado obtenido. Algunos métodos han sido creados para algunos problemas específicos, lo cual no implica que no sean útiles para otro tipo de problemas. Otros métodos son más universales y muchos de estos han llegado a ser populares en varias áreas (Loken, 2007).

A continuación se presenta una recopilación de los aspectos más relevantes de estos métodos.

### **3.2.1.- Justificación de la utilización de métodos multicriterio para la seguridad en galerías de servicios.**

Muchos de los problemas a los que debemos enfrentarnos frecuentemente son complejos, debido fundamentalmente a los aspectos desconocidos que están alrededor de la causa que genera el problema e incertidumbres. Aunque en ocasiones es posible resolverlos basado en la experiencia o la intuición, se ha probado repetidas veces que tales aproximaciones a los problemas complejos pueden conducir a malas soluciones (Ríos et al., 2002). Por ello, es conveniente utilizar modelos y métodos que efectivamente permitan conseguir que la calidad de las decisiones obtenidas sea mejor. De esta manera, la elección de un modelo de planificación de la seguridad en las galerías de servicios.

Los problemas de planificación de la seguridad en galerías de servicios son complejos donde generalmente existen múltiples decisores, múltiples criterios u objetivos, los cuales ameritan la utilización de métodos completos y robustos.

En este contexto, y visto que la planificación de la seguridad representa un problema multidimensional, su expresión matemática es de naturaleza multicriterio-multiobjetivo o viceversa. Basados en estos hallazgos, el análisis de decisiones multicriterio (MCDM) es un método conveniente para tales fines.

La consideración de nuevos criterios en la estructura de decisión para la planificación de la seguridad en las galerías de servicios, nos sugiere la incorporación de diversos elementos relacionados con los aspectos tecnológicos, económicos, sociales y ambientales. Los métodos multicriterio son adecuados para resolver problemas de múltiples dimensiones (Alarcón et al., 2010). Además, los MCDM son convenientes en situaciones de múltiples decisores (Loken, 2007).

### **3.2.2.- Planteamiento del problema de decisión**

El problema de toma de decisiones inherente al análisis de criticidad y amenazas para la planificación de las políticas de seguridad en las galerías de servicios que se pretende resolver es el siguiente:

Dada la necesidad de establecer unas políticas de seguridad en las instalaciones que albergan las galerías de servicios urbanas, se presenta un conjunto finito de alternativas asociadas a las amenazas que se presentan en ellas. En donde uno o varios decisores han de participar en la selección de la mejor alternativa o bien ordenar el conjunto de alternativas desde la mejor hasta la peor, sujeto a un conjunto de criterios o impactos que pueden ocasionar las galerías de servicios ante cualquier evento. En esta situación, no todos los criterios son igualmente importantes.

Se observa que el planteamiento del problema de decisión que se pretende realizar es de tipo discreto, bajo certidumbre y donde uno o varios expertos intervienen en el proceso de decisión (generalmente multiexperto).

Bajo este planteamiento formal se pueden identificar distintas situaciones de decisión multicriterio. Estas situaciones dan lugar a distintos enfoques metodológicos y técnicas de resolución que son objeto de estudio del siguiente apartado.

### **3.2.3.- Clasificación de los métodos MCDM**

En el presente apartado se va a considerar el problema de toma de decisiones multicriterio cuando el conjunto de alternativas factibles es finito. En este caso se dice que el problema es un problema de decisión multicriterio discreto. En adelante se supondrá que el número de alternativas no es muy elevado y que además se conocen explícitamente. En general, se han propuesto numerosos métodos para resolver problemas multicriterio con alternativas discretas.

Los métodos multicriterio se clasifican en tres categorías: modelos de medición del valor, modelos de metas y nivel de preferencia, y los

modelos de ranking o sobreclasificación (Belton & Stewart, 2002) (Ver Figura 2).

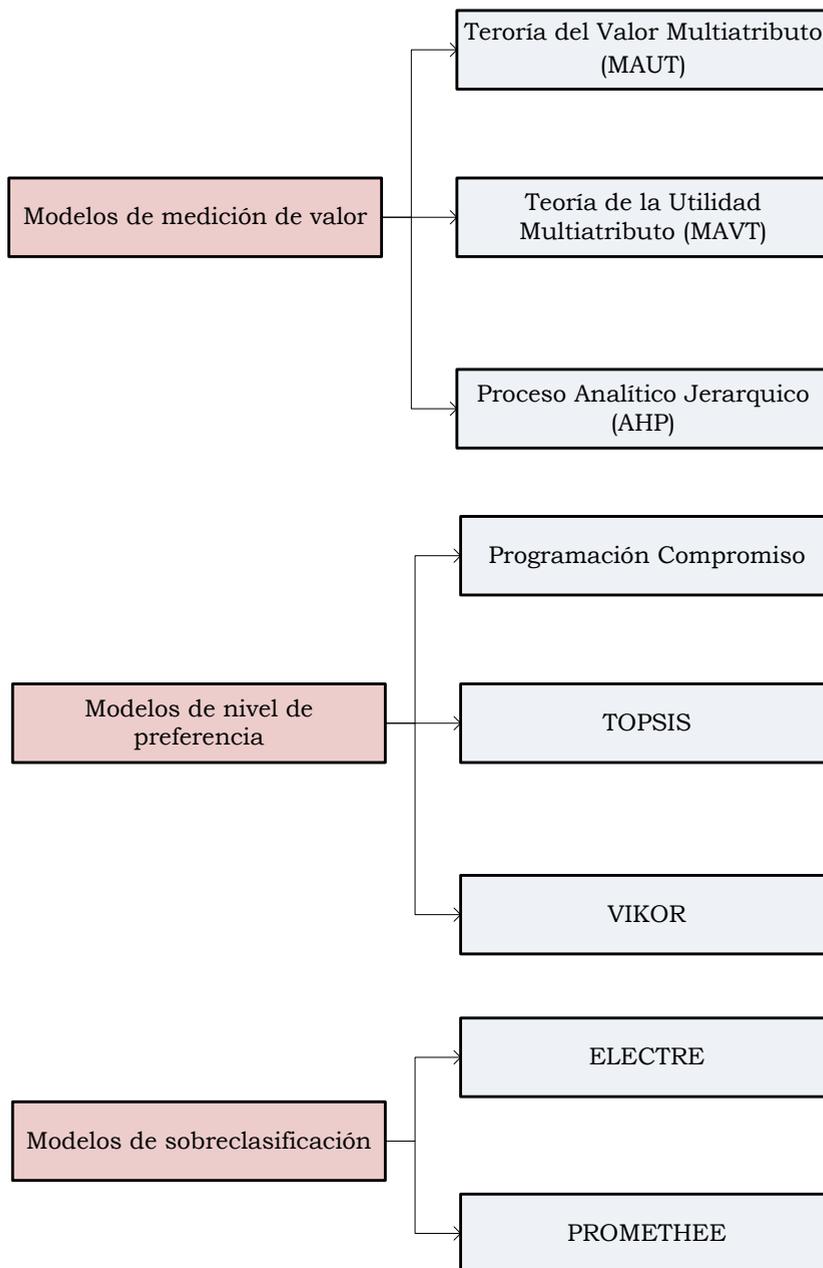
En los modelos de medición del valor, un resultado numérico es asignado a cada alternativa; los resultados producen un orden de preferencia. A cada atributo se le asigna un peso que representa su contribución parcial al resultado total, basado en la importancia de este criterio para los decisores. Los métodos que conforman esta categoría son: MAUT (Teoría de la utilidad multiatributo, siglas en inglés), MAVT (Teoría del valor multiatributo, siglas en inglés) y AHP (Proceso Analítico Jerárquico, siglas en inglés).

El segundo nivel de la clasificación conformado por Programación Compromiso, TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solutions) y VIKOR (Optimización multicriterio y solución compromiso), los modelos de meta y nivel de preferencia representan un método alternativo al anterior, el cual busca determinar las alternativas que estén lo más cerca posible a la solución ideal o al nivel de preferencia.

En los modelos de sobreclasificación, las alternativas son comparadas en forma de pares, para comprobar cuál de ellas es preferida respecto a cada criterio. De esta manera, una alternativa “a” es superior a “b” si hay evidencia para concluir que “a” al menos es tan buena como “b”, cuando se toma en cuenta todos los criterios. ELECTRE (Elimination Et Choix Traduisant la Réalité) y PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations) son los principales métodos de sobreclasificación.

Para la elección del método ideal lo más importante es encontrar el método que mida realmente lo que está suponiendo medir. Además, el método debe ser compatible con los datos disponibles y preferentemente fácil de usar y fácil de entender (Hobbs & Horn, 1997).

A continuación se presenta la definición y características de los métodos MCDM de tipo discreto.



**Figura 2.-** Clasificación de los métodos MCDM de tipo discreto.

### **3.2.3.1.- Modelos de medición del valor**

- Teoría de la Utilidad Multiatributo (MAUT)

En 1944 Von Neumann y Morganstern asentaron las bases de la Teoría de la Utilidad Multiatributo. El método MAUT toma en cuenta las preferencias del decisor en la forma de la función de servicios, la cual es definida sobre un conjunto de atributos (Pohekar & Ramachandran, 2004). MAUT asume que un problema de decisión puede modelarse mediante funciones valoradas reales que pueden ser maximizadas/minimizadas entre las alternativas (García, 2009).

MAUT es uno de los pocos métodos MCDM diseñados especialmente para el tratamiento del riesgo y la incertidumbre (Loken, 2007).

En general, MAUT es uno de los métodos más usados para generar un orden de alternativas.

- Teoría del Valor Multiatributo (MAVT)

Los conceptos teóricos de este modelo fueron descritos por Fishburn en 1967 y posteriormente por Keeney y Raiffa en 1976.

El método MAVT puede ser considerado como una teoría en donde se considera que no hay incertidumbres sobre las consecuencias de las alternativas, a diferencia de MAUT que explícitamente considera que las consecuencias de las alternativas pueden ser inciertas (Güereca, 2006). MAVT es una propuesta simple y fácil de usar donde el decisor, en cooperación con el analista, solo tiene que especificar las funciones de valor y definir los pesos de los criterios para ayudarlo en su proceso de decisión (Pohekar & Ramachandran, 2004).

MAVT es una técnica compensatoria. Esto quiere decir que el método realmente permite la compensación del funcionamiento débil de un criterio por un funcionamiento bueno de otro criterio. Así mismo, MAVT puede ser usado para dirigir los problemas que implican un juego finito y discreto de políticas alternativas que

tienen que ser evaluadas sobre la base de objetivos contrarios. MAVT es un método conveniente para ser aplicado en procesos participativos (Herwijnen, 2006).

El modelo MAVT (en su forma más simple) ha sido usado para apoyar la evaluación de un gran número de problemas en todo el mundo. MAVT es una herramienta útil para apoyar la selección de políticas, planes y proyectos; también puede ser usado para evaluar la sostenibilidad de una política ya que en este modelo se puede tomar en cuenta las tres dimensiones de la sostenibilidad (Herwijnen, 2006).

- Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

El Proceso Analítico Jerárquico fue propuesto por Thomas L. Saaty en 1980. Posteriormente fue mejorado por Saaty en 1994, 1996, 2000 y 2012.

AHP es una poderosa herramienta que puede ser usada para la descomposición de problemas más complejos en un modelo o nodo jerárquico (Chatzimouratidis & Pilavachi, 2009).

El propósito del método es permitir que el agente decisor pueda estructurar un problema multicriterio en forma visual, mediante la construcción de un modelo jerárquico que básicamente contiene tres niveles: meta u objetivo, criterios y alternativas. Una vez construido el Modelo Jerárquico, se realizan comparaciones de pares entre dichos elementos (criterios - subcriterios y alternativas) y se atribuyen valores numéricos a las preferencias señaladas por las personas, entregando una síntesis de las mismas mediante la agregación de esos juicios parciales (Ávila, 2000).

La fundamentación básica de AHP es que el ser humano hace comparaciones entre objetos en su vida diaria en una escala y una cantidad igual a  $n(n-1)/2$ , las comparaciones son necesarias para definir completamente un problema con “n” igual al número de alternativas (Pekka & Raimo, 2005).

El AHP hace posible la toma de decisiones grupal mediante el agregado de opiniones, de tal manera que satisfaga la relación recíproca al comparar dos elementos. Luego toma el promedio geométrico de las opiniones. Cuando el grupo consiste en expertos, cada uno elabora su propia jerarquía, y el AHP combina los resultados por el promedio geométrico (Saaty, 1998).

Los axiomas del AHP son (Vargas, 1990):

- Axioma No. 1 referente a la condición de juicios recíprocos: La intensidad de preferencia de  $A_i/A_j$  es inversa a la preferencia de  $A_j/A_i$ .
- Axioma No. 2 referente a la condición de homogeneidad de los elementos: Los elementos que se comparan son del mismo orden de magnitud.
- Axioma No. 3 referente a la condición de estructura jerárquica o estructura dependiente de reaprovechamiento: Existe dependencia jerárquica en los elementos de dos niveles consecutivos.
- Axioma No. 4 referente a condición de expectativas de orden de rango: Las expectativas deben estar representadas en la estructura en términos de criterios y alternativas.

Los niveles de importancia o ponderación de los criterios se estiman por medio de comparaciones apareadas entre estos. Esta comparación se lleva a cabo usando una escala, la cual se presenta en la Tabla 2.

En el caso de  $n$  atributos la comparación apareada del elemento  $i$  con el elemento  $j$  es colocado en la posición de  $a_{ij}$  de la matriz  $A$  de comparaciones apareadas, tal como se ilustra en la ecuación (1).

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & a_{3n} \end{pmatrix} \quad (1)$$

**Tabla 2.-** Escala fundamental de Saaty para comparaciones por parejas (Saaty, 2012).

<b>Intensidad de la Importancia</b>	<b>Definición</b>	<b>Explicación</b>
1	Igual Importancia	Las dos actividades contribuyen de igual forma al objetivo
3	Importancia Moderada	La experiencia y el juicio favorecen ligeramente una actividad sobre otra
5	Fuerte Importancia	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente una actividad sobre otra
7	Importancia muy fuerte o demostrada	Una actividad se ve favorecida con mucha fuerza sobre la otra. Su dominio se demuestra en la práctica
9	Extrema importancia	La evidencia a favor de una actividad sobre otra es de mayor orden posible
2,4,6,8	Para interpolar entre los valores anteriores	A veces es necesario interponer numéricamente un juicio de transacción, puesto que no hay una palabra apropiada para describirlo
Recíprocos de los anteriores	Si a la actividad $i$ se le ha asignado uno de los números distintos de cero mencionados cuando se compara con la actividad $j$ , entonces $j$ tiene el valor recíproco cuando se la compara con $i$	Una comparación que surge de la elección del elemento más pequeño como unidad, para estimar el mayor como múltiplo de esa unidad

Los valores recíprocos de estas comparaciones son colocados en la posición  $a_{ji}$  de A, con la finalidad de preservar la consistencia del juicio. El decisor participante debe comparar la importancia relativa de un elemento con respecto a un segundo, usando la escala de Saaty mostrada anteriormente en la Tabla 2.

Una vez que se han ingresado los juicios correspondientes en la matriz de comparaciones apareadas, el problema se reduce al cálculo de vectores propios y valores propios, que representan las prioridades y el índice de consistencia del proceso respectivamente (Saaty, 2012). De forma más compacta, decimos que A es consistente si y solo si se cumple la ecuación (2):

$$A \cdot w = \lambda \cdot w \quad (2)$$

Donde A representa la matriz recíproca de comparaciones apareadas (juicios de importancia/preferencia de un criterio sobre otro);  $\lambda$  es el máximo valor propio de A y w corresponde al vector propio correspondiente a  $\lambda$ .

La consistencia se determina utilizando el valor propio,  $\lambda_{\max}$ , para calcular el índice de consistencia, (en inglés CI, Consistency Index) de la siguiente manera:

$$CI = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{(n-1)} \quad (3)$$

donde n es el tamaño de la matriz, o el número de criterios evaluados. Con el fin de verificar si el índice de consistencia es el adecuado, Saaty (Saaty, 2005) sugiere lo que se ha denominado Ratio de Consistencia (en inglés CR, Consistency Rate), que se determina por la relación entre el índice de consistencia y el índice de consistencia aleatorio (en inglés RCI, Random Consistency Index). El cálculo del ratio de consistencia viene dado por la ecuación (4):

$$CR = \frac{CI}{RCI} \quad (4)$$

donde el valor de RCI se fija y se basa en el número de criterios evaluados, como se muestra en la Tabla 3.

**Tabla 3.-** Índice de consistencia aleatorio (RCI) (Saaty, 2012).

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RCI	0	0	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40	1,45	1,49

Una vez calculado el valor de la consistencia, se debe comprobar que es menor que el máximo admitido para que la matriz expuesta pueda usarse en fases posteriores.

Se considera que existe consistencia cuando no se superan los porcentajes que aparecen en la Tabla 4.

**Tabla 4.-** Porcentajes máximos del ratio de consistencia

Tamaño de la matriz (n)	Ratio de consistencia
3	5%
4	9%
5 o mayor	10%

Si el tamaño de la matriz es mayor o igual a 5, se considera que un  $CR < 0,1$  es aceptable, en caso de que sea mayor, se debe pedir al decisor que haga sus valoraciones o juicios nuevamente (acción interactiva).

AHP se fundamenta en: la estructuración del modelo Jerárquico, priorización de los elementos del modelo jerárquico, comparaciones binarias entre los elementos, evaluación de los elementos mediante asignación de “pesos”, ranking de las alternativas de acuerdo con los pesos dados, síntesis y análisis de sensibilidad (Ávila, 2000).

Existen números trabajos publicados sobre las aplicaciones de AHP, podríamos citar aplicaciones como la selección de proveedores en Turquía (Özkan et al., 2011), selección del proceso óptimo para el tratamiento de lixiviados en vertederos (Martin-Utrillas et al., 2015), selección de tecnologías de generación de energía (Loken, 2007), planificación de la energía en el transporte (Yedla & Shrestha, 2003), etc.

### 3.2.3.2.- Modelos de meta y nivel de preferencia

- Programación Compromiso (PC)

Zeleny introdujo este método en 1973 que ayuda al centro decisor a elegir la solución óptima de un conjunto de soluciones eficientes. La PC define la mejor solución como aquella ubicada en el conjunto de soluciones eficientes, cuyo punto representa la menor distancia con relación a un punto ideal. Para poder medir la mayor o menor proximidad de un punto eficiente con respecto al punto ideal, se introduce en el análisis una función de distancia (Zeleny, 1982).

Cuando el punto o alternativa ideal es inalcanzable, la elección óptima o mejor solución compromiso viene dada por la solución eficiente más próxima al punto ideal. Esta regla de comportamiento suele denominarse axioma de Zeleny. En atención a este postulado, dadas las soluciones  $f_1$  y  $f_2$ , la solución preferida será aquella que se encuentre más próxima al punto ideal. Dependiendo de la métrica (denotada como  $\pi$ ) que se elija se tendrán diferentes funciones de distancia, lo que permitirá establecer diferentes conjuntos compromiso.

La formulación de la Programación Compromiso utiliza diferentes funciones de distancia métricas tales como la distancia Manhattan ( $\pi=1$ ,  $D1= a + b$ ) y la distancia Euclidiana ( $\pi=2$ ,  $D2= (a^2 + b^2)^{1/2}$ ). Así como también la distancia de Tchebysheff ( $\pi=\infty$ ,  $D\infty = \max (a, b)$ ).

$$\text{Min}L\pi = \{\sum_{i=1}^n [\omega_i^\pi (f_i^* - f_i(x)) / (f_i^* - f_i^-)]^\pi\}^{1/\pi} \quad (5)$$

Sujeto a:  $X \in F$

Donde  $f_i^*$  representa la función o valor ideal;  $f_i^-$  es la función o valor anti-ideal.

Yu (1973) demostró que, para problemas con dos objetivos, las métricas o puntos  $L_1$  y  $L_2$  definen un subconjunto de la frontera eficiente denominado por Zeleny conjunto compromiso. Las otras mejores soluciones compromiso pertenecen al conjunto acotado por dichos puntos  $L_1$  y  $L_\infty$ . Para problemas con más de dos objetivos, Freimer y Yu (1976), demostraron que los puntos  $L_1$  y  $L_\infty$  no tienen que definir necesariamente un conjunto compromiso, es decir, que pueden existir soluciones compromiso que no pertenezcan al intervalo cerrado  $[L_1, L_\infty]$ . No obstante, esto es poco probable que se presente en la práctica.

La solución aportada por el punto  $L_1$  corresponde a una situación en la que se maximiza la suma ponderada de los logros de cada objetivo, lo que podría representar un punto de máxima eficiencia (lógica de eficiencia), pero que puede estar fuertemente desequilibrado. En contraste, la solución asociada al punto  $L_\infty$  está mejor equilibrada, ya que las discrepancias ponderadas y normalizadas entre el valor alcanzado por cada objetivo y sus respectivos ideales son iguales. En efecto, el carácter equilibrado de esta solución (lógica de equilibrio) dota a este punto de un especial interés para su aplicación en la selección de alternativas (Romero, 1996).

La Programación Compromiso resulta equivalente a la Programación por Meta ponderada bajo la utilización de la distancia  $L_1$ . En el mismo orden de relación, la programación Compromiso es equivalente a la Programación por Metas Mini-Max bajo la métrica  $L_\infty$  (Linares, 1999).

La Programación Compromiso se ha aplicado en diversos campos tales como la planificación del suministro eléctrico (Linares, 1999), la selección de una cartera de proyectos (Bilbao et al., 2006), para el desarrollo de indicadores ecológicos (Manoliadis, 2002), etc.

- TOPSIS

TOPSIS, conocido como uno de los métodos más clásicos MCDM, fue desarrollado primero por Hwang y Yoon (1981), se basa en la idea de que la alternativa elegida debe tener la distancia más corta desde la Solución Ideal Positiva y en el otro lado la distancia más lejana de la Solución Ideal Negativa. La Solución Ideal Positiva maximiza los criterios de beneficios y minimiza los criterios de coste, mientras que la Solución Ideal Negativa maximiza los criterios de costes y minimiza los criterios de beneficios. En el proceso de TOPSIS, las calificaciones de rendimiento y los pesos de los criterios se dan como valores exactos.

Los pasos del modelo TOPSIS son los siguientes (Ghosh et al., 2011):

- ✓ Calcular la matriz de decisión normalizada.
- ✓ Calcular la matriz normalizada de decisión ponderada.
- ✓ Determinar la Solución Ideal Positiva y la Solución Ideal Negativa.
- ✓ Calcular las medidas de separación para cada alternativa de la Solución Ideal Positiva y Negativa.
- ✓ Calcular la relativa cercanía a la solución ideal para cada alternativa.
- ✓ Establecer el orden de preferencia.

Como en los métodos ya expuestos, hay diversas aplicaciones del método TOPSIS, tales como la mejora de la calidad en los servicios de distribución de electricidad de Turquía (Çelen & Yalçın, 2012), planificación de la energía (Kaya & Kahraman, 2011). TOPSIS también ha sido aplicado para decidir inversiones financieras en avanzados sistemas manufactureros, en aplicaciones para seleccionar procesos robotizados, etc.

- Optimización Multicriterio y Solución Compromiso (VIKOR)

Opricovic (1998) y Opricovic y Tzeng (2004) desarrollaron el método VIKOR. Este método fue desarrollado para la optimización multicriterio de sistemas complejos, el cual determina un ranking

de soluciones compromiso. VIKOR fue desarrollado como un método MCDM para resolver problemas de tipo discreto (Opricovic & Tzeng, 2004; Opricovic, 2009) con criterios conflictivos y no cuantificables. El índice del ranking multicriterio obtenido está basado en la medida particular de proximidad a la solución ideal (Opricovic, 1998). El ranking compromiso puede obtenerse por comparación a la medida de proximidad a la alternativa ideal (Opricovic & Tzeng, 2004).

El método se puede desarrollar de la siguiente manera: Se determina la mejor solución (o de compromiso) del conjunto de las diferentes alternativas  $A_1, A_2, \dots, A_j$ , evaluada de acuerdo con el conjunto de funciones de criterio. Los datos de entrada son los elementos  $f_{ij}$  de la matriz de decisión, donde  $f_{ij}$  es el valor de la  $i$ -ésima función criterio para la alternativa  $A_j$ .

El método VIKOR utiliza la métrica  $L_p$  definida de la siguiente forma:

$$L_{pj} = \left\{ \sum_{i=1}^m [\omega_i (f_i^* - f_{ij}) / (f_i^* - f_i^-)]^p \right\}^{1/p} \quad (6)$$

donde

$$1 \leq p \leq \infty;$$

$i = 1, 2, \dots, m$  (número de criterios)

$j = 1, 2, \dots, n$  (número de alternativas)

Donde  $f_i^* = \max f_{ij}$  y  $f_i^- = \min f_{ij}$  si la  $i$ -ésima función representa un criterio de beneficio.

En el método VIKOR se utilizan dos métricas para medir las distancias a la solución ideal, que corresponden a los valores de  $p = 1$  y  $p = \infty$ , obteniendo dos listas,  $S_j$  y  $R_j$  respectivamente (Opricovic & Tzeng, 2004). La solución que presenta la máxima utilidad de grupo es la que obtiene un mínimo valor de  $S_j$ , y la solución que presenta un menor rechazo individual es la que obtiene un valor

mínimo de  $R_j$ . Para controlar el equilibrio entre las dos métricas, el método permite la introducción de un parámetro y cuyo valor dependerá de la estrategia que quiera seguirse, obteniéndose una tercera lista  $Q_j$  que es la que proporciona la solución de compromiso.

De este modo, podemos desarrollar el método VIKOR teniendo en cuenta las siguientes etapas:

**Etapas 1:** Determinación del mejor valor  $f_j^*$  y del peor valor  $f_j^-$  de todas las calificaciones para cada criterio. Tal como se ha indicado anteriormente, si la  $i$ -ésima función representa un criterio de beneficio, tenemos que:

$$f_j^* = \max_i \{f_{ij}\} \quad (7)$$

$$f_j^- = \min_i \{f_{ij}\} \quad (8)$$

**Etapas 2:** Se calculan los valores de  $S_i$  y  $R_i$  con las siguientes ecuaciones

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j \frac{f_j^* - x_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \quad (9)$$

$$R_i = \max_j w_j \frac{f_j^* - x_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \quad (10)$$

Donde  $w_j$  son los pesos de los criterios.

**Etapas 3:** Se calculan los valores  $Q_i$  de la siguiente manera:

$$Q_i = \gamma \frac{S_i - S^*}{S^- - S^*} + (1 - \gamma) \frac{R_i - R^*}{R^- - R^*} \quad (11)$$

donde

$$S^* = \min_i S_i \quad R^* = \min_i R_i$$

$$S^- = \max_i S_i \qquad R^- = \max_i R_i$$

siendo  $\gamma$  el peso para la estrategia de máxima utilidad del grupo, o máximo consenso, y  $(1 - \gamma)$  el peso para el menor rechazo individual.

**Etapa 4:** Se clasifican las alternativas, ordenadas por los valores S, R y Q en orden ascendente.

**Etapa 5:** Se propone la alternativa ( $A^{(1)}$ ) como una solución de compromiso, que está clasificada como la mejor por el valor de Q (mínimo), si se cumplen las dos condiciones siguientes:

*Condición 1:* Ventaja aceptable

$$Q(A^{(2)}) - Q(A^{(1)}) \geq DQ \qquad (12)$$

Donde  $A^{(2)}$  es la alternativa encontrada en segunda posición en el ranking de Q, y  $DQ = 1/(J-1)$ .

*Condición 2:* Estabilidad aceptable en la toma de decisiones

La alternativa  $A^{(1)}$  debe ser también la mejor clasificada por S y/o R. La solución de compromiso es estable en un proceso de toma de decisiones que podría ser por la estrategia de máxima utilidad del grupo (siendo necesario  $\gamma > 0.5$ ), o por consenso ( $\gamma \sim 0.5$ ), o "con veto" ( $\gamma < 0.5$ ). Hay que tener en cuenta que  $\gamma$  es el peso de la estrategia en la toma de decisiones.

Si una de las condiciones no se cumple, entonces se propone un conjunto de soluciones de compromiso, que consiste en:

- Alternativas  $A^{(1)}$  y  $A^{(2)}$  si solo la condición C2 no se satisface, o
- Alternativas  $A^{(1)}, A^{(2)}, \dots, A^{(M)}$  si la condición C1 no se satisface;  $A^{(M)}$  se determinada por la relación  $Q(A^{(M)}) - Q(A^{(1)}) < DQ$  para el máximo valor M.

VIKOR ha sido ampliamente aplicado en diferentes problemas MCDM de diversos campos tales como la reconstrucción sostenible después de un terremoto (Opricovic & Tzeng, 2002), formulación de

políticas ambientales asociadas a la calidad del aire (Tzeng et al., 2002), en el diseño de experimentos (Tong et al., 2007), en la planificación de recursos hídricos (Opricovic, 2009); selección de un servicio Web (Khezrian et al., 2011), etc.

### **3.2.3.3.- Modelos de sobreclasificación**

- ELECTRE

ELECTRE (Elimination Et Choix Traduisant la Réalité) fue inicialmente propuesto por Benayoun, Roy y Sussman en 1966 y posteriormente mejorado por Roy (1971). El método se conoció cuando un artículo de B. Roy apareció en una revista de investigación francesa más ampliamente. Se convirtió en ELECTRE I (Electre uno) y las evoluciones han continuado con ELECTRE II, ELECTRE III, ELECTRE IV, ELECTRE ES y ELECTRE TRI (árbol Electre), por mencionar algunos. Se utilizan en los campos de los negocios, el desarrollo, el diseño, y pequeñas centrales hidroeléctricas.

El método ELECTRE consiste en un procedimiento para reducir el tamaño del conjunto de soluciones eficientes. Tal reducción se realiza por medio de una partición del conjunto eficiente en un subconjunto de alternativas más favorables para el centro decisor (el núcleo) y en otro subconjunto de alternativas menos favorables. Para abordar tal tarea, se introduce el concepto de relación de sobreclasificación.

- PROMETHEE

El método PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations) fue desarrollado por Brans y Vincke en 1985 y consiste en una construcción de relaciones de superación valorizadas, la cual introduce el flujo neto de preferencia como una función de agregación, la cual se denota de la siguiente manera:  $\varphi_a = \varphi_a^+ - \varphi_a^-$ ,  $a = 1, \dots, A$  de modo que, una alternativa  $a$  superará a otra  $b$  si  $\varphi_a > \varphi_b$  y serán indiferentes si  $\varphi_a = \varphi_b$ . Este flujo de orden neto elimina el problema de los aspectos

incomparables entre las alternativas, aunque se pierda parte de la información proporcionada por los anteriores flujos.

PROMETHEE tiene una aplicación particular en la toma de decisiones, y se usa en todo el mundo en una amplia variedad de escenarios de decisión, en campos como negocios, instituciones gubernamentales, transporte, salud y educación. Así, se ha utilizado para evaluar la explotación de las energías renovables, (Georgopoulou et al., 1998), para el desarrollo de nuevos sistemas energéticos en Taiwán (Tzeng et al., 1992), etc.



## **CAPÍTULO 4. PROPUESTA METODOLÓGICA**

---

## **CAPÍTULO 4.- PROPUESTA METODOLÓGICA**

En el capítulo anterior se revisaron los aspectos más elementales del análisis o toma de decisiones multicriterio y los diferentes modelos que forman parte de esta interesante metodología. El análisis de decisiones no es una tarea sencilla. En este capítulo se pretende aportar una metodología que constituya una guía práctica, sencilla, estructurada y coherente a la realidad que aplica para facilitar la toma de decisiones en las políticas de seguridad en las galerías de servicio. Para ello, pretendemos que la propuesta permita ofrecer a los decisores mejorar la calidad de las decisiones de una manera sencilla, económica, transparente, fiable y relativamente rápida.

### **4.1.- Presentación de la propuesta**

Esta metodología sigue el planteamiento realizado, la cual se ha particularizado a la toma de decisiones multicriterio con las alternativas referentes a las amenazas a la seguridad en las galerías de servicios, de tipo discreto empleando dos técnicas MCDM. La metodología propone el uso de las técnicas de decisión multicriterio AHP y VIKOR que serán aplicadas posteriormente de forma real, obteniendo una ponderación de las amenazas a la seguridad en las galerías de servicios.

El método AHP se utilizará para establecer la ponderación de preferencia global que los decisores asignarán a cada uno de los criterios y alternativas. El método VIKOR, permitirá generar un ranking de soluciones compromiso en función de los criterios y ponderaciones tomadas en cuenta para tal propósito, que en principio no debería diferir del obtenido con el AHP. Mostraremos la coherencia de los resultados obtenidos por ambos métodos, mostrando así la robustez de las decisiones a tomar en este caso, dada la importancia de las consecuencias que implican los errores de decisión de seguridad en este campo.

El objetivo fundamental de la propuesta de metodología consiste en evaluar coherente y apropiadamente un conjunto de alternativas

expresadas de manera discreta para facilitar la toma de decisiones en la seguridad de las galerías de servicios.

#### **4.2.- Algoritmo de la metodología**

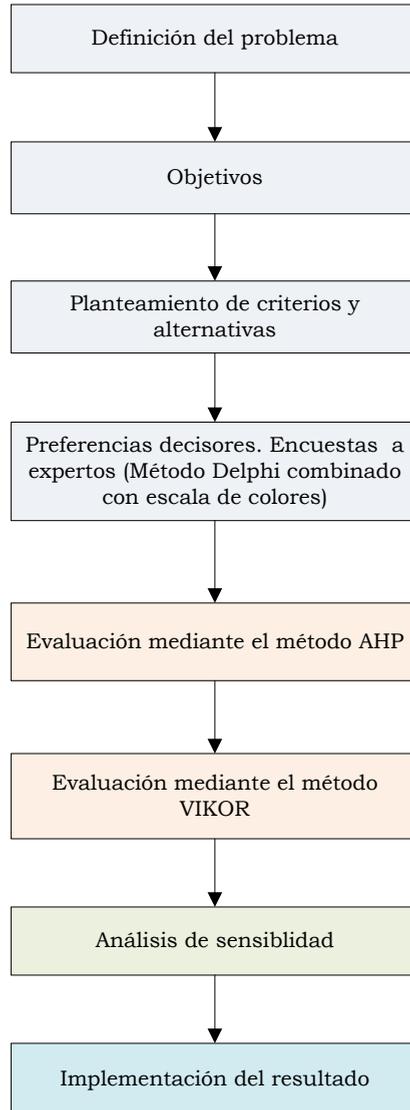
En la figura 3 se resume el algoritmo de la metodología propuesta. Inicialmente se identifica y define el problema a resolver. Posteriormente se define el objetivo que se persigue como resultado de la aplicación del método en las galerías de servicios. Se definirán los criterios y alternativas para elaborar la matriz de decisión, una matriz que permitirá ampliar la información de cada una de las alternativas en función de los criterios considerados en la toma de decisiones. Previamente se habrá procedido a consultar los grupos de expertos para que ponderen la importancia de criterios y alternativas. Para esta consulta, se utilizará el método Delphi combinado con una escala de colores en las respuestas basada en el grado de importancia. A continuación se aplicará el método AHP para obtener la ponderación global de los criterios y alternativas. También aplicaremos el método VIKOR para obtener un nuevo ranking de soluciones compromiso, el cual será comparado con el dado por el AHP.

Por último, si el planificador no está satisfecho con la solución identificada, inmediatamente debe realizarse un análisis de sensibilidad. Con este análisis se valorará como puede ser afectada la solución identificada frente a la posibilidad de variación de los pesos o preferencias de los criterios.

Finalizada la última etapa del proceso de análisis o toma de decisiones, se debe implementar el resultado obtenido.

#### **4.3.- Definición del problema**

Los servicios públicos urbanos se enfrentan a amenazas a la seguridad tales como las que acontecen en muchas empresas. Estas incluyen a los empleados y clientes descontentos y enojados, así como el robo. Sin embargo, debido a la naturaleza única de los servicios públicos urbanos, estos son también blanco de vándalos, extremistas y otros que quieren atacar una infraestructura.



**Figura 3.-** Algoritmo de la metodología propuesta.

La seguridad es importante en todas las empresas, pero, para los servicios públicos, una seguridad adecuada, incluidos los planes de aumento de los niveles de seguridad, es una necesidad absoluta

para la protección del sistema, los clientes, los empleados y los activos.

La criticidad es la consecuencia potencial de un ataque exitoso u otro evento adverso, incluyendo los desastres naturales (Seger, 2003).

Para comprender mejor el significado de criticidad consideremos por ejemplo, el impacto en la infraestructura nacional, regional o local mediante la revisión de los efectos en cascada de un fallo de un componente de la infraestructura. Si el servicio eléctrico se interrumpe a una comunidad local por un período prolongado de tiempo, ¿cuáles son los efectos en cascada? Las plantas de tratamiento de agua y tratamiento de aguas residuales no podrían operar. Los hospitales y otras instalaciones de atención médica tienen sistemas de respaldo, pero ¿por cuánto tiempo podrían operar? ¿Otras instalaciones críticas tienen sistemas de apoyo capaces de funcionar durante largos períodos de tiempo sin servicio eléctrico? En muchos casos, los componentes de una infraestructura crítica se consideran desde una perspectiva individual. Pero en realidad, cuando uno de los componentes de una infraestructura crítica es afectado, este tiene un efecto cascada en otros componentes críticos de la infraestructura. Los posibles efectos en cascada deben ser considerados al realizar un análisis de criticidad.

Así, todos los semáforos pueden estar fuera de servicio debido a que el suministro eléctrico se ha interrumpido. ¿Cuál es el impacto en la población local? En las pequeñas poblaciones, el impacto es mínimo, porque sólo hay unos pocos semáforos, y la policía local respondería rápidamente a la situación empleando agentes para el control del tráfico. En una gran ciudad, la situación es diferente. Hay mucho más tráfico y los semáforos resultan críticos en su control. La policía podría estar también respondiendo a otras necesidades de seguridad, como el control de multitudes, y habría un menor número de agentes, por población, para el control del tráfico. La situación podría ser crítica.

Cuando existe la obligación de proporcionar determinados servicios públicos en un área, si un punto crítico de su sistema es atacado y se interrumpe el servicio, ¿cuál es el impacto en un negocio y sus operaciones? ¿Con qué rapidez se va a poder restaurar el servicio? ¿Qué ingresos se pierden como consecuencia del ataque y la interrupción, y cómo se van a recuperar?

Si una bomba explota en una instalación, ¿cuáles serían las pérdidas potenciales de vidas? Si se suelta un material peligroso, ¿cuántas personas se verán afectadas? Una consideración clave en la evaluación de la criticidad es el efecto potencial de un incidente en una ubicación específica de las personas que trabajan en esa instalación. Si una bomba explota en una subestación eléctrica, se puede interrumpir el servicio en una zona aislada por un tiempo limitado. Pero si la misma bomba estalla en las áreas de almacenamiento de cloro de una planta de tratamiento de agua o en una instalación de gas natural o propano, el daño podría ser mucho mayor. Para cualquier incidencia que se produzca en cualquier sitio, ¿qué haría falta para responder? Esta es la consideración para el análisis de las consecuencias. Cuanto mayor es la posible consecuencia de un evento, mayor es su criticidad. La criticidad se refiere a veces como la gravedad de la consecuencia de un evento.

Las amenazas a la seguridad de las que las galerías de servicios necesitan ser protegidas deben identificarse para cada caso particular, teniendo en cuenta tanto las amenazas internas como externas (Canto-Perelló & Curiel-Esparza, 2013; Caponecchia, 2012; Lemley, Fthenakis & Moskowitz, 2003; Li et al., 2009; Seger, 2003). Obviamente, las amenazas pueden ser originadas por más de un grupo, con diferentes métodos y propósitos.

El problema que se pretende resolver desde el punto de vista metodológico implica mejorar la calidad de decisión con relación a tomar las mejores políticas de seguridad teniendo en cuenta un conjunto de amenazas propuestas relativas a las galerías de servicios, basándose en los múltiples criterios (impactos en nuestro problema) y la opinión de diferentes expertos que puedan ayudar al proceso de toma de decisión. El proceso debe ser entendido como un problema de ordenamiento de diferentes alternativas (amenazas en nuestro problema), de tipo discreto basadas en una serie de

criterios previamente definidos y ponderados por los distintos grupos de expertos (decisores). Desde este punto de vista se considera el análisis como un enfoque de un problema de decisión multicriterio, de tipo discreto, multiexperto y bajo certidumbre, donde el ordenamiento de las alternativas constituye el objetivo central. Para tal efecto, se propone una metodología novedosa y original para la evaluación multicriterio de diferentes alternativas (amenazas) en las galerías de servicio.

#### **4.4.- Objetivos**

Para visualizar los problemas mencionados en un marco complejo pero organizado, al mismo tiempo que resulte fácil pensar en ellos de forma fácil, utilizaremos el proceso analítico jerárquico (Analytic Hierarchy Process, AHP), de forma que nos permita tomar decisiones eficaces sobre los problemas complejos a través de la simplificación y aceleración de nuestros procesos naturales de toma de decisiones. Básicamente, el AHP es un método que consiste en descomponer una situación no estructurada y compleja en sus partes; ordenar estas partes o variables en un orden jerárquico; asignar valores numéricos a juicios o pensamientos subjetivos sobre la importancia relativa de cada variable, y sintetizar los juicios para determinar qué variables tienen mayor prioridad y como debe actuarse sobre ellas para influir sobre el resultado de la situación (Saaty, 2008).

La organización de las amenazas y los impactos en una estructura jerárquica sirve para dos objetivos. En primer lugar, se muestra una vista general del complejo problema detectado en los análisis de seguridad. Y en segundo lugar, ayuda a comparar los criterios con precisión. Con el fin de evaluar las prioridades, se requiere que las amenazas y los impactos a comparar estén en capas graduales en la jerarquía, para que sea significativo compararlos en relación con el elemento de nivel superior (Saaty, 2012). Dado que los recursos son limitados, este método de clasificación de los impactos y las amenazas será útil en el establecimiento de prioridades para la implementación de infraestructuras y programas de seguridad.

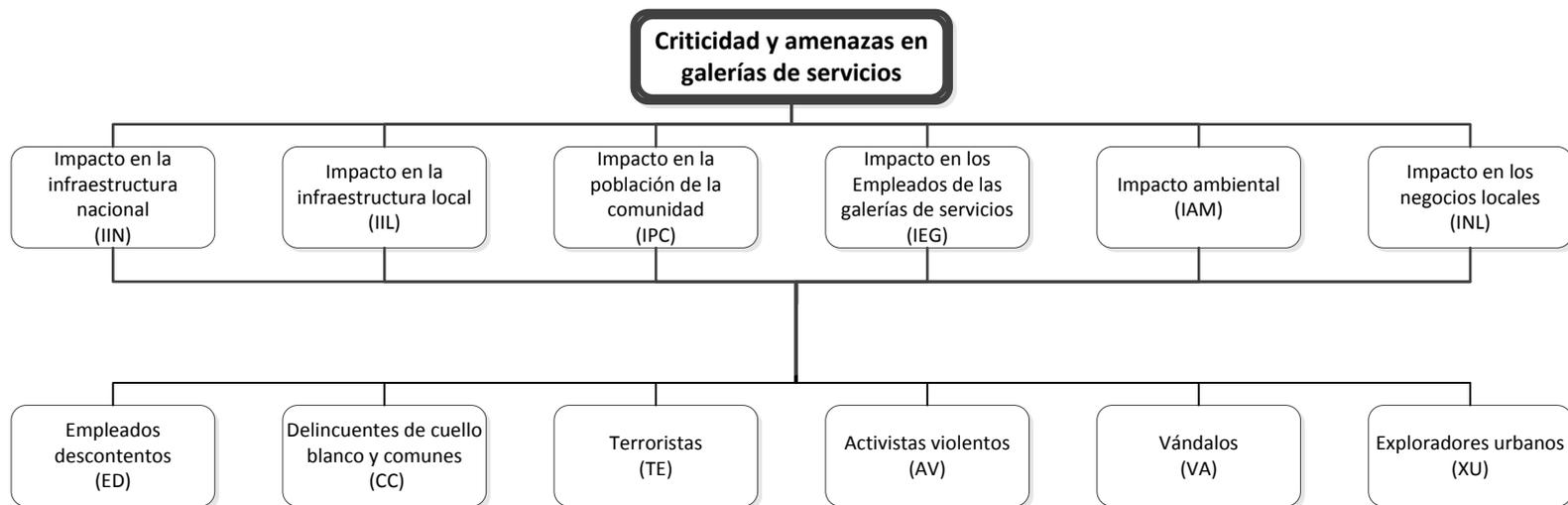
Las jerarquías son una herramienta fundamental de la mente humana. Ayudan a comprender la identificación de los elementos de un problema, a agrupar los elementos en conjuntos homogéneos, y a acomodar estos conjuntos en niveles diferentes (Saaty, 2012).

El nivel superior, llamado foco, consta de un elemento: el objetivo global, que en nuestro caso es el análisis de criticidad y amenazas en las galerías de servicios, cuya utilidad, antes mencionada, recaerá en el establecimiento de mejoras en las políticas de seguridad en las galerías. Los niveles siguientes están formados por elementos del mismo orden, en nuestro caso el siguiente nivel lo constituyen los criterios o impactos para la obtención de la criticidad en las galerías de servicios que se han mencionado previamente. Por último terminamos la jerarquía con los elementos o variables que formaran las alternativas, que no son más que las amenazas mencionadas anteriormente, de forma que cada una de ellas pueda ser comparada en función de un criterio del nivel superior.

Teniendo en cuenta los impactos y amenazas que deben ser considerados, y siguiendo el paso inicial de la metodología AHP (Ozdemir y Saaty, 2006; Saaty, 2008; Thapa y Murayama, 2010), el análisis es descompuesto en una estructura jerárquica de múltiples niveles tal como se muestra en la Figura 4.

El siguiente paso en el AHP será la estimación de los datos adecuados, para este fin emplearemos el método Delphi, utilizando además una escala basada en un código de colores.

De este modo, los resultados obtenidos en el análisis podrán ser utilizados para diseñar requerimientos administrativos y físicos necesarios para evitar la entrada de personas no autorizadas, redes de vigilancia de televisión, dispositivos de detección y otros sistemas de seguridad. Como en casos similares (Canto-Perelló & Curiel-Esparza, 2001; Tang, Li Feng, & Zhou, 2009), el coste de la integración de las medidas de seguridad durante la fase de proyecto de cualquier instalación es mucho menor que la adopción una vez que se ha construido.



**Figura 4.-** Estructura jerárquica para determinar la criticidad y amenazas en las galerías de servicios urbanas.

#### **4.5.- Planteamiento de alternativas y selección de criterios para la toma de decisiones**

Se establece que el conjunto de alternativas posibles es numerable, tratándose por lo tanto de un problema de decisión discreto.

Para dar respuesta a este problema, se plantean distintas alternativas (amenazas), cuya ponderación final servirá para establecer las políticas de seguridad más adecuadas.

Obviamente, las amenazas pueden ser originadas por más de un grupo, con diferentes métodos y propósitos. En general al menos están presentes las siguientes amenazas (Figura 4):

- Los Empleados descontentos (ED). Los empleados despedidos o maltratados son impredecibles en términos de comportamiento, ya que cada persona reacciona de forma diferente a las presiones del trabajo.
- Delincuentes de cuello blanco y comunes (CC). Estos delincuentes utilizan las galerías de servicios para robar información de las redes de telecomunicación o para acceder a otras instalaciones y edificios vecinos que están entre sus objetivos finales.
- Terroristas (TE). Las galerías de servicios podrían ser su propio objetivo o como antes, utilizarse para tener acceso a otras instalaciones o edificios.
- Activistas violentos (AV). Sus acciones están dirigidas a interrumpir los servicios públicos para hacer visibles sus argumentos y obtener ganancias políticas a través de sus acciones.
- Vándalos (VA). Provocan daños en los sistemas de galerías de servicios tales como, saqueos, pintadas, la colocación de pegamento en las cerraduras y demás.
- Exploradores Urbanos (XU). Son grupos de personas conocidas como urbex que disfrutan explorando activamente las infraestructuras subterráneas y compartiendo sus fotografías en internet. La regla de la exploración urbana "no tomes nada más que fotografías, no dejes nada, solo huellas" pueden parecer no tener malicia, pero debido a la colocación

de información sobre el acceso a las galerías de servicios en páginas web anónimas, hace relativamente fácil que los terroristas o saboteadores puedan entrar en estas.

Hay un número de criterios diferentes que deben evaluarse cuando se determina la criticidad en las instalaciones urbanas. Así, en las galerías de servicios podríamos considerar los siguientes criterios (Figura 4):

- Impacto en la infraestructura nacional (IIN).
- Impacto en la infraestructura local (IIL).
- Impacto en la población de la comunidad (IPC).
- Impacto en los empleados de las galerías de servicios (IEG).
- Impacto ambiental (IAM).
- Impacto en los negocios locales (INL).

#### **4.6.- Preferencia de los decisores. Método Delphi**

Las personas y las organizaciones tomamos continuamente decisiones, algunas de las cuales manifiestan sus consecuencias en el largo plazo. Para decidir entre alternativas diferentes necesitamos información, y parte de esta información es relativa al futuro.

La ciencia ha desarrollado numerosas técnicas que, partiendo de datos de sucesos pasados y a través de un desarrollo matemático más o menos complejo, proporcionan luz sobre ese futuro. El problema aparece cuando esos modelos matemáticos no pueden ser aplicados porque no tenemos datos que extrapolar, o porque la velocidad del cambio invalida cualquier referencia cuantitativa pasada. En estos casos sólo queda la opción de acudir a la experiencia e intuición. Ahora bien, esta intuición individual o colectiva, este juicio subjetivo de ciertas personas informadas, con experiencia y con un conocimiento privilegiado (expertos), debe ser estructurada y canalizada convenientemente, conjugada con la información disponible y el saber acumulado hasta hoy. Esto es lo que intentan hacer las diferentes técnicas que implementan la información subjetiva en su desarrollo, entre las que se encuentra el método Delphi.

El método Delphi es una técnica de previsión grupal que se nutre del juicio de expertos. Se viene empleando con relativa asiduidad desde los años setenta en los ámbitos empresariales, consultores y académicos, para la previsión de eventos en condiciones de incertidumbre, situación, por otra parte, cada vez más frecuente (Landeta, 2002).

Así pues, se trata de un método de estructuración de un proceso de comunicación grupal que es efectivo a la hora de permitir a un grupo de individuos, como un todo, tratar un problema complejo (Listone y Turoff, 1975).

Las características básicas (Dalkey & Helmer, 1963) de esa estructuración, que definen esta técnica y la diferencian de otras técnicas grupales, son:

- mantenimiento del anonimato de los participantes;
- retroacción o *feedback* controlado;
- respuesta estadística de grupo.

Tenemos, por tanto, que el método Delphi es un proceso sistemático e iterativo encaminado hacia la obtención de las opiniones, y si es posible del consenso, de un grupo de expertos. Las influencias negativas de los miembros dominantes del grupo se evitan gracias al anonimato de sus participantes. El *feedback* controlado, y generalmente sumariado, por el conductor del método, permite la transmisión de información libre de «ruidos» entre los expertos a lo largo de las iteraciones que se dan en el proceso y, por último, la respuesta estadística de grupo garantiza que todas las opiniones individuales sean tomadas en consideración en el resultado final del grupo.

El método Delphi tiene un predecesor que básicamente comparte sus mismas características: el método «Vaticano». El método Vaticano es un antiguo procedimiento mediante el cual los cardenales pretendían alcanzar una opinión o decisión consensuada sobre temas importantes relativos a la religión católica (Landeta, 2002).

El objeto del método Delphi es obtener una visión fiable de un panel de expertos. El proceso guía a los expertos hacia un consenso (Chow y Sadler, 2010; Gracht, 2012; Mullins, 2006). Es importante estudiar las opiniones de expertos de diferentes campos. En nuestro caso, se ha usado un tamaño de un panel de diez expertos. Después de la selección del panel de expertos, se lleva a cabo la primera ronda de cuestionarios (ver Tabla 5) para analizar la criticidad en las galerías de servicios.

**Tabla 5.-** Primera ronda del cuestionario para evaluar la criticidad en galerías de servicios.

Análisis de criticidad en galerías de servicios en áreas urbanas	
Q1	¿Cómo de críticas son las galerías de servicios con respecto al <b>impacto en la infraestructura nacional (IIN)</b> vs. <b>impacto en la infraestructura local (IIL)</b> ? Más  Menos
Q2	¿Cómo de críticas son las galerías de servicios con respecto al <b>impacto en la infraestructura nacional (IIN)</b> vs. <b>impacto en la población de la comunidad (IPC)</b> ? Más  Menos
Q3	¿Cómo de críticas son las galerías de servicios con respecto al <b>impacto en la infraestructura nacional (IIN)</b> vs. <b>impacto en los empleados de las galerías de servicios (IEG)</b> ? Más  Menos
Q4	¿Cómo de críticas son las galerías de servicios con respecto al <b>impacto en la infraestructura nacional (IIN)</b> vs. <b>impacto ambiental (IAM)</b> ? Más  Menos
Q5	¿Cómo de críticas son las galerías de servicios con respecto al <b>impacto en la infraestructura nacional (IIN)</b> vs. <b>impacto en los negocios locales (INL)</b> ? Más  Menos
Q6	¿Cómo de críticas son las galerías de servicios con respecto al <b>impacto en la infraestructura local (IIL)</b> vs. <b>impacto en la población de la comunidad (IPC)</b> ? Más  Menos
Q7	¿Cómo de críticas son las galerías de servicios con respecto al <b>impacto en la infraestructura local (IIL)</b> vs. <b>impacto en los empleados de las galerías de servicios (IEG)</b> ? Más  Menos

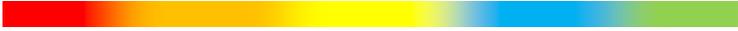
**Tabla 5 (Cont.).-** Primera ronda del cuestionario para evaluar la criticidad en galerías de servicios. Continuación.

Análisis de criticidad en galerías de servicios en áreas urbanas	
Q8	¿Cómo de críticas son las galerías de servicios con respecto al <b>impacto en la infraestructura local (IIL)</b> vs. <b>impacto ambiental (IAM)</b> ?
	Más  Menos
Q9	¿Cómo de críticas son las galerías de servicios con respecto al <b>impacto en la infraestructura local (IIL)</b> vs. <b>impacto de los negocios locales (INL)</b> ?
	Más  Menos
Q10	¿Cómo de críticas son las galerías de servicios con respecto al <b>impacto en la población de la comunidad (IPC)</b> vs. <b>impacto en los empleados de las galerías de servicios (IEG)</b> ?
	Más  Menos
Q11	¿Cómo de críticas son las galerías de servicios con respecto al <b>impacto en la población de la comunidad (IPC)</b> vs. <b>impacto ambiental (IAM)</b> ?
	Más  Menos
Q12	¿Cómo de críticas son las galerías de servicios con respecto al <b>impacto en la población de la comunidad (IPC)</b> vs. <b>impacto en los negocios locales (INL)</b> ?
	Más  Menos
Q13	¿Cómo de críticas son las galerías de servicios con respecto al <b>impacto en los empleados de las galerías de servicios (IEG)</b> vs. <b>impacto ambiental (IAM)</b> ?
	Más  Menos
Q14	¿Cómo de críticas son las galerías de servicios con respecto al <b>impacto en los empleados de las galerías de servicios (IEG)</b> vs. <b>impacto en los negocios locales (INL)</b> ?
	Más  Menos
Q15	¿Cómo de críticas son las galerías de servicios con respecto al <b>impacto ambiental (IAM)</b> vs. <b>impacto en los negocios locales (INL)</b> ?
	Más  Menos

Para la evaluación de la opinión de los expertos se lleva a cabo una escala de colores para hacer concretas y viables las expresiones individuales. El uso de la escala de color elimina la ansiedad en el proceso de decisión y ayuda al pensamiento creativo. Los resultados de cada ronda de cuestionarios se transmiten a los panelistas, lo que permite a los expertos ajustar sus respuestas con el fin de

obtener una retroalimentación en rondas posteriores. Se dispone de varios métodos en AHP para llevar a cabo la agregación, a saber el método de la media geométrica y el de la media aritmética (Ramanathan, 2001). En nuestro caso, el método de la media geométrica se puede utilizar para construir matrices de comparación pareadas de juicios de expertos. Realizando el mismo procedimiento anterior, se lleva a cabo un segundo cuestionario para evaluar las principales amenazas (ver Tabla 6).

**Tabla 6.-** Segunda ronda del cuestionario para evaluar las principales amenazas en las galerías de servicios.

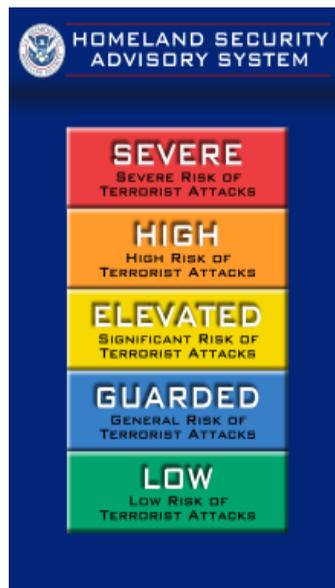
Análisis de las posibles amenazas en las galerías de servicios con respecto al impacto en la infraestructura nacional (IIN)	
Q1	¿Cómo de crítico son los <b>empleados descontentos</b> (ED) cuando son comparados con los <b>delincuentes de cuello blanco y comunes</b> (CC)?
	Más  Menos
Q2	¿Cómo de crítico son los <b>empleados descontentos</b> (ED) cuando son comparados con los <b>terroristas</b> (TE)?
	Más  Menos
Q3	¿Cómo de crítico son los <b>empleados descontentos</b> (ED) cuando son comparados con los <b>activistas violentos</b> (AV)?
	Más  Menos
Q4	¿Cómo de crítico son los <b>empleados descontentos</b> (ED) cuando son comparados con los <b>vándalos</b> (VA)?
	Más  Menos
Q5	¿Cómo de crítico son los <b>empleados descontentos</b> (ED) cuando son comparados con los <b>exploradores urbanos</b> (XU)?
	Más  Menos
Q6	¿Cómo de crítico son los <b>delincuentes de cuello blanco y comunes</b> (CC) cuando son comparados con los <b>terroristas</b> (TE)?
	Más  Menos
Q7	¿Cómo de crítico son los <b>delincuentes de cuello blanco y comunes</b> (CC) cuando son comparados con los <b>activistas violentos</b> (AV)?
	Más  Menos

**Tabla 6 (Cont.).-** Segunda ronda del cuestionario para evaluar las principales amenazas en las galerías de servicios. Continuación.

Análisis de las posibles amenazas en las galerías de servicios con respecto al impacto en la infraestructura nacional (IIN)	
Q8	¿Cómo de crítico son los <b>delincuentes de cuello blanco y comunes</b> (CC) cuando son comparados con los <b>vándalos</b> (VA)?
	Más  Menos
Q9	¿Cómo de crítico son los <b>delincuentes de cuello blanco y comunes</b> (CC) cuando son comparados con los <b>exploradores urbanos</b> (XU)?
	Más  Menos
Q10	¿Cómo de crítico son los <b>terroristas</b> (TE) cuando son comparados con los <b>activistas violentos</b> (AV)?
	Más  Menos
Q11	¿Cómo de crítico son los <b>terroristas</b> (TE) cuando son comparados con los <b>vándalos</b> (VA)?
	Más  Menos
Q12	¿Cómo de crítico son los <b>terroristas</b> (TE) cuando son comparados con los <b>exploradores</b> (XU)?
	Más  Menos
Q13	¿Cómo de crítico son los <b>activistas violentos</b> (AV) cuando son comparados con los <b>vándalos</b> (VA)?
	Más  Menos
Q14	¿Cómo de crítico son los <b>activistas violentos</b> (AV) cuando son comparados con los <b>exploradores urbanos</b> (XU)?
	Más  Menos
Q15	¿Cómo de crítico son los <b>vándalos</b> (VA) cuando son comparados con los <b>exploradores urbanos</b> (XU)?
	Más  Menos

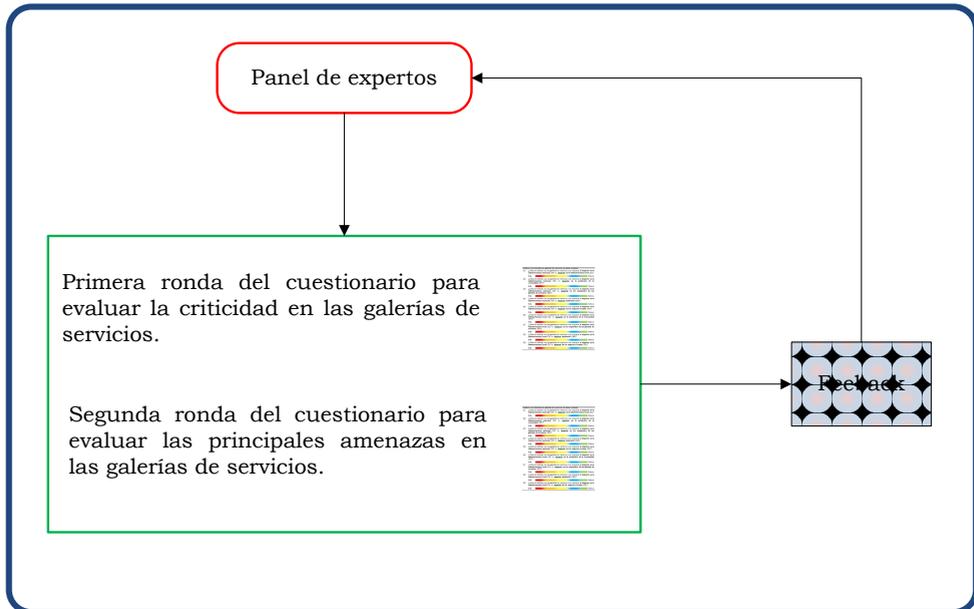
Las escalas con códigos de colores usadas en los análisis de riesgos y seguridad han sido desarrolladas por un gran número de organizaciones (ANSI Z535.1-2006 - R, 2011). Por ejemplo, la American Public Works Association (APWA) alienta a los organismos públicos y empresas privadas involucrados en la ingeniería subterránea a adoptar un código de colores uniforme para la ubicación de servicios APWA (APWA, American Public Works

Asociación, 1999). Este código de marcado proporciona reglas para la marca temporal de las instalaciones del subsuelo para prevenir accidentes y daños o interrupciones de servicios públicos por contratistas, excavadores, compañías de servicios, municipalidades o cualesquier persona que trabaje en o cerca de las instalaciones subterráneas. En los Estados Unidos, el Departamento de Seguridad Nacional (Department of Homeland Security) utilizó una escala para aviso de amenaza mediante un código de cinco colores (baja = verde; moderada = azul; elevada = amarillo; alta = naranja; severa = rojo) (ver Figura 5) con el fin de proporcionar un procedimiento eficaz para gestionar la información respecto a los riesgos (HSPD3, Homeland Security Presidential Directiva 3), 2002). Además, durante la década de 1970, Regnier propuso una técnica de consulta a expertos en prospectiva estratégica mediante una boleta de votación coloreada, conocida como Abacus de Regnier que todavía está en uso (Godet y Durance, 2011; Godet, Durance, y Gerber, 2006; Regnier, 1975; Régnier, 1989). Por lo tanto, las escalas de códigos de colores se han utilizado en las obras públicas, seguridad y en el análisis estratégico.



**Figura 5.-** Código de colores utilizados por el Departamento de Seguridad Nacional de EEUU.

La idea principal será buscar la opinión de los expertos utilizando una escala de colores que oscile del verde al rojo. En la Figura 6 se resume el proceso descrito en este apartado. Así pues, para determinar la preferencia de los expertos se realizarán dos rondas de cuestionarios, la primera ronda referente a los impactos y la segunda referente a las amenazas respecto a cada impacto, teniendo en cuenta la retroalimentación, tal como indica el método Delphi.



**Figura 6.-** Proceso para la determinación de las preferencias de los expertos.

#### 4.7.- Matriz de decisión

Una matriz de decisión es una herramienta de evaluación que prioriza una lista de opciones. La matriz de decisión se puede utilizar para la planificación de proyectos para asegurar que se tomen buenas decisiones, ya que cada opción se está ponderando. Una matriz de decisión se utiliza a menudo para reducir una lista de opciones. La matriz de decisión resume la evaluación de cada alternativa conforme a los criterios y de la estructura jerárquica. La escala de medida de las evaluaciones puede ser cuantitativa o

cualitativa, y las medidas pueden expresarse en escala cardinal, ordinal, nominal y probabilísticas.

Para construir la matriz de decisión, es necesario seguir los siguientes pasos:

- Listar las opciones de decisión.
- Listar los factores importantes a tener en cuenta.
- Complimentación de la matriz de decisión. Para ello se debe colocar en la primera columna el conjunto de alternativas (como encabezado de filas); en la fila superior colocar cada uno de los criterios con sus unidades respectivas (como encabezado de columna).
- Determinar los valores de las alternativas en función de los criterios propuestos.

Por último, la construcción final de esta matriz dependerá del método MCDM que se utilice.

En nuestro caso pondremos en la primera columna de la matriz de decisión las amenazas (alternativas) y en la fila superior los impactos (criterios), tal como se muestra en la Tabla 7. Mostrando así, los pesos de las amenazas para cada impacto.

**Tabla 7.-** Matriz de decisión propuesta.

IMPACTOS	IIN	IIL	IPC	IEG	IAM	INL
AMENAZAS						
ED						
CC						
TE						
AV						
VA						
XU						

## **4.8.- El proceso analítico jerárquico (AHP) para el análisis de la criticidad en galerías de servicios.**

### **4.8.1.- Establecimiento de las prioridades de los impactos y amenazas.**

El objetivo de este paso es construir un vector de prioridades o pesos que evalúe la importancia relativa que la unidad decisora otorga a cada criterio.

El problema clave que se plantea en este punto es responder cómo se puede asignar un valor numérico a cada criterio que represente, del modo más ajustado posible, la preferencia del decisor de un criterio frente a otro.

El método AHP utiliza una estrategia de asignación indirecta por la que el decisor sólo tiene que realizar una valoración sobre la importancia del criterio verbalizada en términos cualitativos y después acudir a una escala, que previamente ha sido establecida, para obtener los valores numéricos que se corresponden con su valoración. Por tanto, como paso previo a la resolución del problema de asignación de pesos, se debe definir la correspondencia entre la valoración cualitativa del decisor y la asignación numérica (Aznar y Guijarro, 2012). Para ello utilizaremos la escala sugerida por Saaty (ver Tabla 2).

Luego el decisor debe establecer las prioridades mediante comparación entre pares y, así, determinar los pesos relativos de los criterios. Los números de la escala representan la proporción en la que uno de los elementos que se consideran en la comparación pareada domina al otro respecto a una propiedad o criterio que tienen en común. El elemento menor tiene el valor recíproco o inverso respecto al mayor, es decir, si  $x$  es el número de veces que un elemento domina a otro, entonces este último es  $x^{-1}$  veces dominado por el primero, de tal modo que  $x \cdot x^{-1} = 1$ .

En 1846 Weber manifestó su ley con respecto a un estímulo de magnitud medible. De acuerdo con su ley un cambio en la sensibilidad se nota si el estímulo se incrementa en un porcentaje

constante (Saaty, 1980). Es decir, las personas no pueden tomar decisiones a partir de un conjunto infinito. Por ejemplo, la gente no puede distinguir entre dos valores muy cercanos de importancia, es decir 3,00 y 3,02. Los experimentos psicológicos han demostrado que los individuos no pueden comparar simultáneamente más de siete objetos (más o menos dos) (Miller, 1956). Este es el razonamiento principal utilizado por Saaty para establecer 9 como el límite superior de su escala, 1 como límite inferior y una unidad de diferencia entre los valores sucesivos en la escala. Los valores de las comparaciones por pares en el AHP se determinan de acuerdo a la escala introducida por Saaty (1980). De acuerdo con esta escala, los valores disponibles para las comparaciones por pares pertenecen al conjunto: {9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2,1, 1/2, 1/3, 1/4, 1/ 5, 1/6, 1/7, 1/8, 1/9} (Tabla 2).

Con el método Delphi utilizando una escala de códigos de colores, se logrará la interacción entre el grupo de expertos con un feedback anónimo, mientras que el AHP lo utilizaremos para dividir la previsión general en componentes más pequeños.

Como el AHP necesita valores numéricos para construir matrices de comparaciones pareadas, los términos con código de color serán traducidos a la escala AHP de 9 puntos que evalúa la intensidad de la criticidad, como se muestra en las Tablas 8 y 9. Esta escala ha sido validada por su eficacia, no sólo en muchas aplicaciones por una serie de personas, sino también a través de comparaciones teóricas con un gran número de otras escalas (Saaty, 1990). Como resultado de la aplicación de esta escala fundamental se obtendrá la matriz de evaluación de la criticidad de cada experto a partir de las Tablas 5 y 6. Es decir, de los resultados de los cuestionarios en los que se ha aplicado el método Delphi con código de colores para establecer las preferencias de los expertos, obtendremos sus valores cuantitativos mediante la equivalencia de la escala de colores con la escala de Saaty, tal como se indica en la Figura 7.

**Tabla 8.-** Equivalencia de la escala AHP de 9 puntos con la escala de colores utilizada para evaluar la intensidad de la criticidad de los impactos.

<b>Código de Colores</b>	<b>Significado</b>	<b>Intensidad de la criticidad</b>
	Un impacto es <b>extremadamente crítico</b> (XC) con respecto al otro.	9
	Un impacto es <b>muy fuertemente crítico</b> (FC) con respecto al otro.	7
	Un impacto es <b>moderadamente crítico</b> (MC) con respecto al otro.	5
	Un impacto es <b>ligeramente crítico</b> (LC) con respecto al otro.	3
	Un impacto es <b>igual de crítico</b> (IC) con respecto al otro.	1
	Un impacto es <b>ligeramente no crítico</b> (LN) con respecto al otro.	1/3
	Un impacto es <b>moderadamente no crítico</b> (MN) con respecto al otro.	1/5
	Un impacto es <b>muy fuertemente no crítico</b> (FN) con respecto al otro.	1/7
	Un impacto es <b>extremadamente no crítico</b> (XN) con respecto al otro.	1/9

**Tabla 9.-** Equivalencia de la escala AHP de 9 puntos con la escala de colores utilizada para evaluar la intensidad de la criticidad de las amenazas.

<b>Código de Colores</b>	<b>Significado</b>	<b>Intensidad de la criticidad</b>
	Una amenaza es <b>extremadamente crítica</b> (XC) con respecto a la otra.	9
	Una amenaza es <b>muy fuertemente crítica</b> (FC) con respecto a la otra.	7
	Una amenaza es <b>moderadamente crítica</b> (MC) con respecto a la otra.	5
	Una amenaza es <b>ligeramente crítica</b> (LC) con respecto a la otra.	3
	Una amenaza es <b>igual de crítica</b> (IC) con respecto a la otra.	1
	Una amenaza es <b>ligeramente no crítica</b> (LN) con respecto a la otra.	1/3
	Una amenaza es <b>moderadamente no crítica</b> (MN) con respecto a la otra.	1/5
	Una amenaza es <b>muy fuertemente no crítica</b> (FN) con respecto a la otra.	1/7
	Una amenaza es <b>extremadamente no crítica</b> (XN) con respecto a la otra.	1/9

### Rondas de cuestionarios. Aplicación del método Delphi.

(Tabla 5)

Análisis de unidades en galerías de servicios de áreas urbanas	
Q1	¿Cómo de crítico son las galerías de servicios con respecto al impacto en la infraestructura nacional (IN) vs. impacto en la infraestructura local (LL)?
Más	
Menos	
Q2	¿Cómo de crítica son las galerías de servicios con respecto al impacto en la infraestructura nacional (IN) vs. impacto en la producción de la comunidad (CP)?
Más	
Menos	
Q3	¿Cómo de crítica son las galerías de servicios con respecto al impacto en la infraestructura nacional (IN) vs. impacto en los empleados de las galerías de servicios (ES)?
Más	
Menos	
Q4	¿Cómo de crítica son las galerías de servicios con respecto al impacto en la infraestructura nacional (IN) vs. impacto ambiental (AM)?
Más	
Menos	
Q5	¿Cómo de crítica son las galerías de servicios con respecto al impacto en la infraestructura nacional (IN) vs. impacto en los negocios locales (NL)?
Más	
Menos	
Q6	¿Cómo de crítica son las galerías de servicios con respecto al impacto en la infraestructura local (LL) vs. impacto en la producción de la comunidad (CP)?
Más	
Menos	
Q7	¿Cómo de crítica son las galerías de servicios con respecto al impacto en la infraestructura local (LL) vs. impacto en los empleados de las galerías de servicios (ES)?
Más	
Menos	
Q8	¿Cómo de crítica son las galerías de servicios con respecto al impacto en la infraestructura local (LL) vs. impacto ambiental (AM)?
Más	
Menos	
Q9	¿Cómo de crítica son las galerías de servicios con respecto al impacto en la infraestructura local (LL) vs. impacto de los negocios locales (NL)?
Más	
Menos	

(Tabla 6)

Análisis de las posibles amenazas en las galerías de servicios con respecto al impacto en la infraestructura nacional (IN)	
Q1	¿Cómo de crítica son los empleados descontentos (ED) cuando son comparados con los delincuentes de calle (MC) y criminales (CC)?
Más	
Menos	
Q2	¿Cómo de crítica son los empleados descontentos (ED) cuando son comparados con los terroristas (TE)?
Más	
Menos	
Q3	¿Cómo de crítica son los empleados descontentos (ED) cuando son comparados con los activistas voluntarios (AV)?
Más	
Menos	
Q4	¿Cómo de crítica son los empleados descontentos (ED) cuando son comparados con los vandales (VA)?
Más	
Menos	
Q5	¿Cómo de crítica son los empleados descontentos (ED) cuando son comparados con los exploradores urbanos (EU)?
Más	
Menos	
Q6	¿Cómo de crítica son los delincuentes de calle (MC) y criminales (CC) cuando son comparados con los terroristas (TE)?
Más	
Menos	
Q7	¿Cómo de crítica son los delincuentes de calle (MC) y criminales (CC) cuando son comparados con los activistas voluntarios (AV)?
Más	
Menos	
Q8	¿Cómo de crítica son los delincuentes de calle (MC) y criminales (CC) cuando son comparados con los vandales (VA)?
Más	
Menos	
Q9	¿Cómo de crítica son los delincuentes de calle (MC) y criminales (CC) cuando son comparados con los exploradores urbanos (EU)?
Más	
Menos	

### Equivalencia de la escala AHP de 9 puntos con la escala de colores utilizada.

(Tabla 8)

Código de Colores	Significado	Intensidad de la criticidad
	Un impacto es extremadamente crítico (XC) con respecto al otro.	9
	Un impacto es muy fuertemente crítico (FC) con respecto al otro.	7
	Un impacto es moderadamente crítico (MC) con respecto al otro.	5
	Un impacto es ligeramente crítico (LC) con respecto al otro.	3
	Un impacto es igual de crítico (IC) con respecto al otro.	1
	Un impacto es ligeramente no crítico (LN) con respecto al otro.	1/3
	Un impacto es moderadamente no crítico (MN) con respecto al otro.	1/5
	Un impacto es muy fuertemente no crítico (FN) con respecto al otro.	1/7
	Un impacto es extremadamente no crítico (XN) con respecto al otro.	1/9

(Tabla 9)

Código de Colores	Significado	Intensidad de la criticidad
	Una amenaza es extremadamente crítica (XC) con respecto a la otra.	9
	Una amenaza es muy fuertemente crítica (FC) con respecto a la otra.	7
	Una amenaza es moderadamente crítica (MC) con respecto a la otra.	5
	Una amenaza es ligeramente crítica (LC) con respecto a la otra.	3
	Una amenaza es igual de crítica (IC) con respecto a la otra.	1
	Una amenaza es ligeramente no crítica (LN) con respecto a la otra.	1/3
	Una amenaza es moderadamente no crítica (MN) con respecto a la otra.	1/5
	Una amenaza es muy fuertemente no crítica (FN) con respecto a la otra.	1/7
	Una amenaza es extremadamente no crítica (XN) con respecto a la otra.	1/9

Figura 7.- Proceso para la obtención de los valores cuantitativos.

#### **4.8.2.- Análisis de la criticidad de los impactos mediante matrices de comparación pareadas.**

El primer paso al establecer las prioridades de los elementos en un problema de decisión es hacer comparaciones por pares, es decir, comparar los elementos en pares con respecto a un criterio dado. Para las comparaciones en pares, la forma preferida es una matriz. La matriz es una herramienta simple y comprobada, que ofrece un marco para probar la consistencia, obteniéndose información adicional por medio de todas las comparaciones posibles y del análisis de sensibilidad de las prioridades globales ante los cambios en los juicios. El enfoque de matriz refleja como ninguno los aspectos duales de las prioridades: los dominantes y los dominados (Saaty, 2012).

Para comenzar el proceso de comparación por pares, se debe empezar en la parte superior de la jerarquía seleccionando el criterio C, o propiedad, que se usará para realizar la primera comparación. Luego, a partir del nivel inmediatamente inferior, se toman los elementos que se compararán:  $A_1, A_2, A_3$ , etc. En nuestro caso hay seis elementos. Disponemos entonces estos elementos en una matriz, donde los  $A_i$  serán los impactos ya mencionados, es decir, el primer nivel de la jerarquía y los compararemos en función de la criticidad, es decir, las consecuencias potenciales de un ataque en la galería de servicios.

La matriz (A) de comparación por pares de la criticidad de la galería de servicios para los impactos, se construirá utilizando la media geométrica, obtenida de los expertos previa aplicación de la escala fundamental de Saaty a las respuestas indicadas por ellos. De esta forma, conseguiremos la agregación de las preferencias del panel de los 10 expertos a los que se realizaron las encuestas aplicando el método Delphi (ver Figura 8).

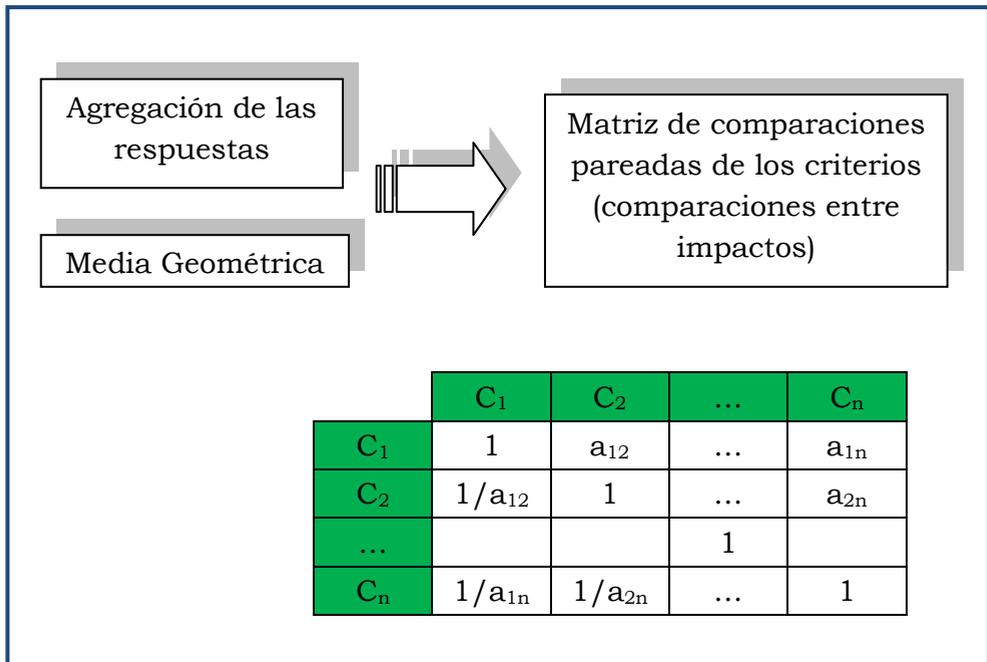
Teniendo en cuenta la escala de Saaty y la media geométrica obtenida para la agregación de los expertos, se construirá una matriz cuadrada  $A = [a_{ij}]$  donde  $1 \leq i, j \leq n$  siendo  $n=6$  en nuestro caso, y que llamamos matriz de comparaciones pareadas, donde  $a_{ij}$  representa la comparación entre el elemento  $i$  y el elemento  $j$  a

partir de los valores de la escala fundamental tras aplicar la media geométrica.

La matriz construida debe de cumplir las siguientes propiedades (Saaty, 1986):

- Reciprocidad: Si  $a_{ij} = x$ , entonces  $a_{ji} = 1/x$ , con  $1/9 \leq x \leq 9$
- Homogeneidad: Si los elementos  $i$  y  $j$  son considerados igualmente importantes entonces  $a_{ij} = a_{ji} = 1$ , además  $a_{ii} = 1$  para todo  $i$ .
- Consistencia: Se satisface que  $a_{jk} \cdot a_{kj} = a_{ji}$  para todo  $1 \leq i, j, k \leq n$ .

Por la propiedad de Reciprocidad solo se necesitan  $n(n-1)/2$  comparaciones para construir una matriz de dimensión  $n \times n$ . En nuestro caso  $n = 6$ , luego se necesitarán 15 comparaciones.



**Figura 8.-** Agregación de las preferencias del panel de expertos para la obtención de la matriz de comparaciones pareadas.

Para obtener las prioridades de un grupo de comparaciones en pares, un problema de decisión, tenemos que reunir los juicios hechos en las comparaciones en pares o sintetizarlos, es decir, tenemos que hacer alguna tarea de ponderación y suma para que nos dé un número único que indique la prioridad de cada elemento (Saaty, 2012).

Construida la matriz de comparaciones pareadas se calculará su vector propio. Aplicaremos el método de las potencias, es decir, el cálculo se realiza multiplicando la matriz por ella misma, se suman las filas, y se normaliza por la suma cada uno de los elementos, con lo que obtenemos una matriz columna. Esta matriz columna es el vector propio aproximado de la matriz inicial. Se repite la operación anterior (multiplicación de la matriz resultante por sí misma, obtención del vector propio) hasta que el vector propio obtenido no se diferencie del anterior hasta la cuarta cifra decimal, con lo que ya se habrá conseguido una aproximación suficiente del vector propio buscado (Aznar & Guijarro, 2012).

El vector propio  $\omega$  de la matriz A determina la criticidad relativa de cada impacto individual.

En los problemas de toma de decisiones es importante conocer hasta dónde llega la consistencia, ya que no es deseable que la decisión se base en juicios de tan baja consistencia que parezcan aleatorios. Luego el paso previo al cálculo del vector propio debería ser la verificación de la consistencia de las matrices de comparaciones pareadas.

El método de Saaty mide la inconsistencia de la matriz de comparación por pares y establece un umbral de coherencia que no debe superarse en aras de garantizar el procedimiento. Es decir, los expertos a menudo no son capaces de expresar sus preferencias consistentes en las previsiones de elecciones múltiples. Para solucionar esto, el ratio de consistencia (CR) se considera como el principal indicador del ranking de consistencia, tal como se comentó en la sección anterior. En la práctica, un CR de 0,1 o inferior se considera aceptable para un orden de la matriz (n) igual o superior a cinco. Cualquier valor más alto indica que las previsiones

deben reexaminarse. El CR se obtiene dividiendo el índice de consistencia (CI) por el índice de consistencia aleatoria (RCI) según Saaty (1980), ver ecuación (4).

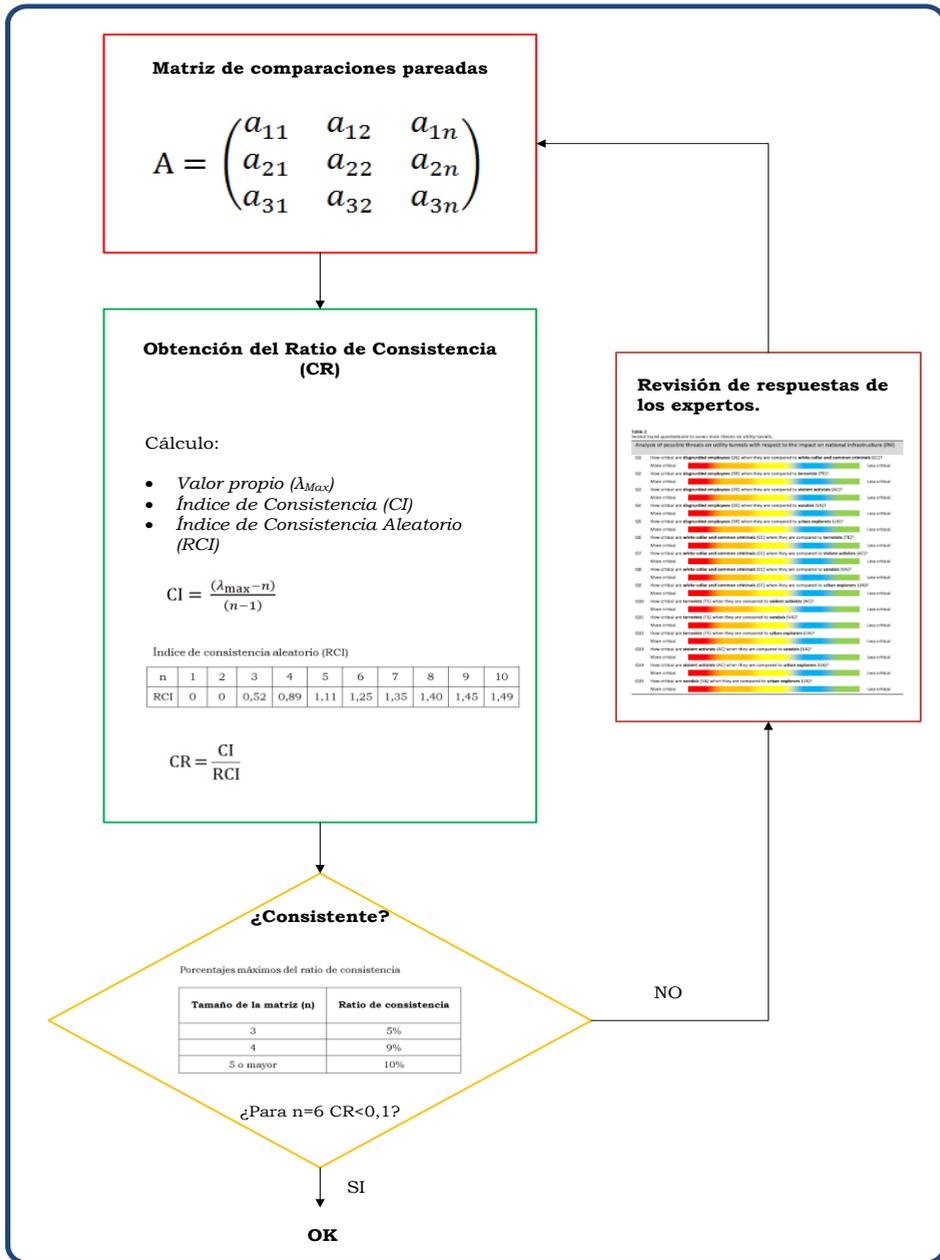
Se debe evaluar el máximo valor propio ( $\lambda_{\max}$ ) de la matriz de comparación por pares normalizada ( $A_N$ ) para obtener el CI. El índice de consistencia se determinará utilizando la ecuación (3).

Este CI obtenido se compara con los valores aleatorios de CI que son el valor que debería obtener el CI si los juicios numéricos introducidos en la matriz original (de la cual estamos midiendo su consistencia) fueran aleatorios dentro de la escala 1/9, 1/8, 1/7, ..., 1/2, 1, 2, ..., 7, 8, 9. Los valores son los que aparecen en la Tabla 3.

En función de n se elige la consistencia aleatoria que en nuestro caso será n=6. Se considerará que existe consistencia cuando no se superan los porcentajes que aparecen en la Tabla 4.

Si la relación de consistencia de una matriz individual o de toda la jerarquía se encuentra que es inaceptable, los juicios de los expertos deberán ser revisados. Además, los juicios y los resultados no se podrán extrapolar a cualquier otro caso, ya que todos los datos son empíricos y proporcionados por el panel de expertos. Por otra parte, cualquier alteración importante de la red de galerías de servicios existentes precisaría de una nueva evaluación por el panel de expertos.

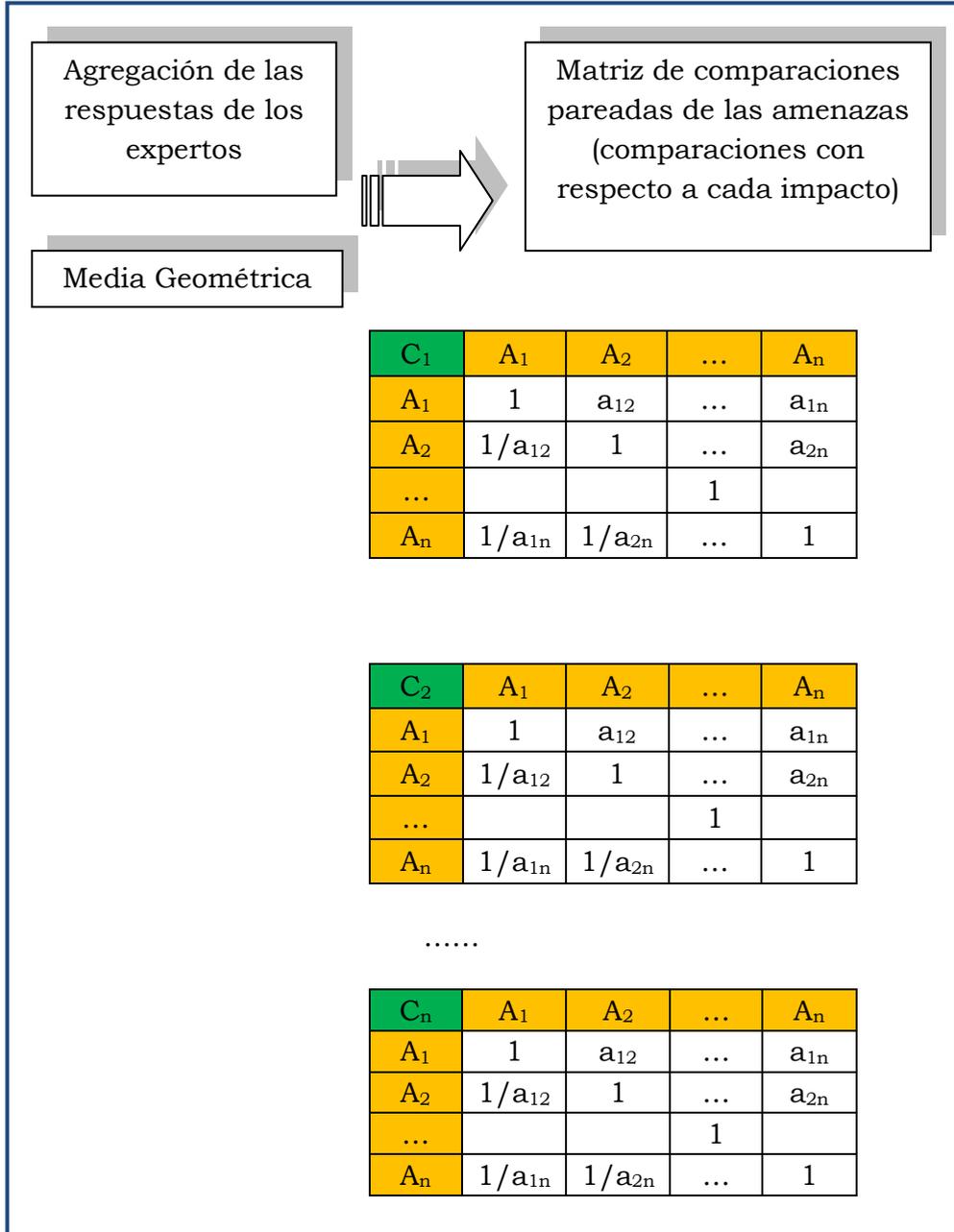
La Figura 9 ilustra el proceso que se sigue para evaluar la consistencia de la matriz de comparaciones pareadas.



**Figura 9.-** Proceso para la evaluación de la consistencia de la matriz de comparaciones pareadas.

#### **4.8.3.- Clasificación de las amenazas usando matrices de comparaciones pareadas.**

El siguiente paso es evaluar cuán importante son las amenazas con respecto a cada impacto. Con este fin, se evaluará el segundo cuestionario que se envió a los expertos. A modo de ejemplo, la Tabla 6 muestra uno de los cuestionarios de evaluación de amenazas con respecto a un impacto individual (IIN-Impacto en la Infraestructura Nacional) para ilustrar mejor el uso del procedimiento propuesto. Cada experto realizará una comparación por pares para indicar su preferencia para cada amenaza, y luego se convertirá a una escala de AHP utilizando la Tabla 9, tal como se ha indicado anteriormente. A continuación se construirá una matriz de comparaciones por pares de las amenazas utilizando la media geométrica de las valoraciones de los expertos. Como en la sección anterior, se aplicará el método del vector propio para obtener el vector de prioridad, y se realizará el análisis de consistencia para cada caso. El último paso consistirá en calcular la clasificación global de las amenazas. En primer lugar, se construirá una matriz con los vectores que indican la importancia de las amenazas para cada impacto, dando lugar a la matriz decisión, tal como se ha indicado en la Tabla 7. Finalmente, la clasificación global se obtendrá mediante la multiplicación entre la matriz amenazas vs. impactos (nuestra matriz decisión) y el vector de criticidad de los impactos. La Figura 10 ilustra el conjunto de matrices pareadas de las amenazas con respecto a cada impacto (será necesario un total de seis matrices), donde las alternativas  $A_i$  representarán las amenazas y los criterios  $C_i$  a los impactos, siendo las entradas de las matrices los valores agregados correspondientes a la media geométrica de las valoraciones del panel de expertos.

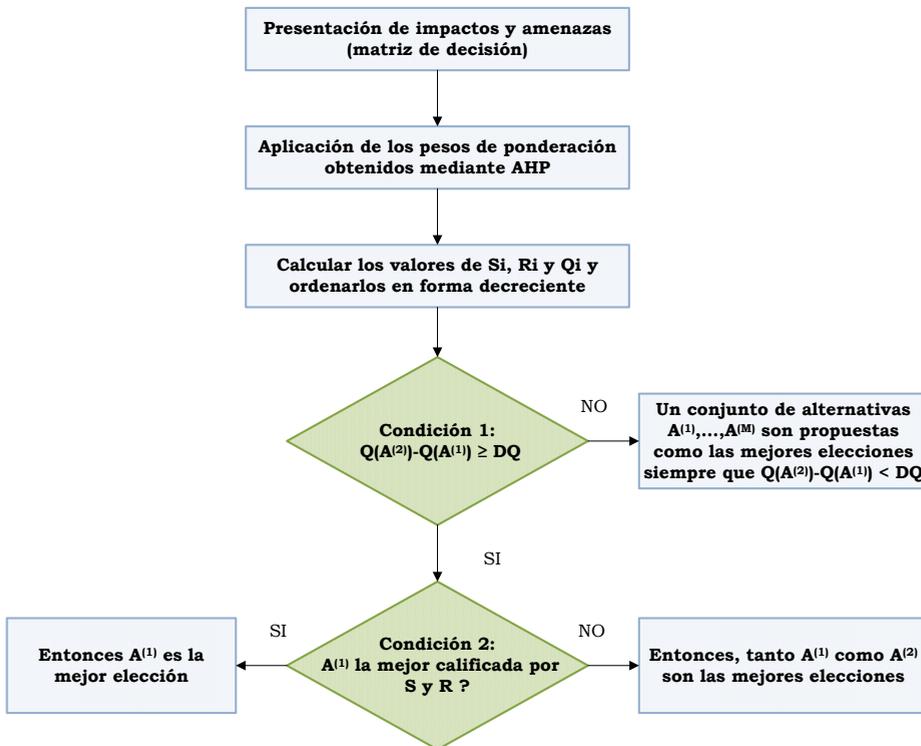


**Figura 10.-** Obtención de las matrices de comparaciones pareadas de las amenazas.

## 4.9.- VIKOR

Se propone la utilización del método VIKOR por su compatibilidad de combinación con el método AHP. De modo que, las debilidades de uno se compensen con las fortalezas del otro y así aportar un mayor consenso en los resultados obtenidos. Con el método AHP obtendremos una asignación de los pesos de las preferencias de los expertos o decisores y con el método VIKOR podremos hacer una selección u ordenamiento jerarquizado de las amenazas, basándonos en la medida de proximidad a la solución ideal.

Seguiremos la metodología con las etapas que se expusieron en el capítulo precedente y tal como se puede observar en el diagrama de flujo de la Figura 11.



**Figura 11.-** Diagrama de flujo del método VIKOR propuesto.

#### 4.10.- Análisis de sensibilidad

La investigación sobre el análisis de sensibilidad de los métodos de decisión MCDM es limitada. Un estudio reciente aplicado a los procesos AHP se debe a Masuda. Masuda (Masuda, 1990) estudia qué efecto puede tener en el ranking de las alternativas los cambios en los vectores enteros de la matriz de decisión. Ese autor considera múltiples niveles de jerarquías.

El análisis de sensibilidad que se aplica, desarrollado por Triantaphyllou y Sánchez, es complementario al desarrollado por Masuda, por lo que puede aplicarse conjuntamente. El enfoque propuesto puede centrarse en los juicios individuales mientras que el enfoque Masuda considera un único vector en un momento dado (Triantaphyllou & Sánchez, 1997). Otros investigadores presentaron también un procedimiento para determinar el criterio más importante para un problema AHP con jerarquía de un solo nivel (Armacost & Hosseini, 1994) sin embargo, este último trabajo no determina explícitamente cuál es el cambio más pequeño en el peso de un criterio que haga cambiar la vigente clasificación de las alternativas.

En los procesos de toma de decisiones, los pesos asignados a los criterios de decisión intentan representar la verdadera importancia de los criterios. Cuando los criterios no se pueden expresar en términos cuantitativos (tales como el coste, peso, volumen, etc.), entonces es difícil representar con precisión la importancia de estos criterios. En una situación como ésta, el proceso de toma de decisiones se puede mejorar considerablemente mediante la identificación de los criterios críticos y luego volver a evaluar con mayor precisión los pesos de estos criterios. La creencia intuitiva es que el criterio con el peso más alto es el más crítico (Winston, 1991), pero esto no siempre es cierto y en algunos casos el criterio con el peso más bajo puede ser el más crítico.

El decisor puede tomar mejores decisiones si puede determinar cómo de crítico es cada criterio. En otras palabras, si sabe cómo la sensibilidad de la clasificación actual de las alternativas cambia según cambian los pesos actuales de los criterios de decisión. En

esta tesis abordamos dos problemas de análisis de sensibilidad estrechamente relacionados. En el primero se determina cómo de crítico es cada criterio mediante la realización de un análisis de sensibilidad sobre los pesos de los criterios. Este enfoque de análisis de sensibilidad determina cuál es el cambio más pequeño en las ponderaciones actuales de los criterios que puede alterar la clasificación actual de las alternativas. En el segundo problema, se utiliza un concepto similar para determinar cómo de críticas son las diversas medidas de rendimiento  $a_{ij}$  de las alternativas (en función de un único criterio de decisión cada vez).

Hay tres pasos principales al utilizar un método de decisión multicriterio discreto:

1. Determinar los criterios y alternativas pertinentes.
2. Utilizar medidas numéricas en la importancia relativa de los criterios, es decir, los pesos de los criterios, y los pesos de las alternativas en términos de estos criterios.
3. Procesar los valores numéricos para determinar el ranking de cada alternativa.

Considerando un problema de toma de decisiones con  $N$  criterios y  $M$  alternativas (en nuestro caso  $N=6$  y  $M=6$ ). Las alternativas se indican como  $A_i$  (para  $i = 1, 2, 3, \dots, M$ ) y los criterios se representan como  $C_j$  (para  $j = 1, 2, 3, \dots, N$ ). Para cada criterio  $C_j$  el conjunto de expertos ha determinado su importancia, o peso,  $W_j$ , de modo que se cumple la siguiente relación:

$$\sum_{j=1}^N W_j = 1 \quad (13)$$

Además, el conjunto de expertos ha determinado los  $a_{ij}$  (para  $i = 1, 2, 3, \dots, M$  y  $j = 1, 2, 3, \dots, N$ ), es decir, la importancia (o medida de rendimiento) de la alternativa  $A_i$  en función del criterio  $C_j$ .

Por tanto, el punto de partida para el análisis de sensibilidad vendrá marcado por la matriz de decisión, ver Tabla 10.

Representamos por  $P_i$  (para  $i = 1, 2, 3, \dots, M$ ) la preferencia final de la alternativa  $A_i$  cuando todos los criterios de decisión son considerados y ordenamos las alternativas considerando la siguiente relación de preferencia:

$$P_1 \geq P_2 \geq P_3 \geq \dots \geq P_M \quad (14)$$

**Tabla 10.-** Matriz de Decisión en el análisis de sensibilidad

	Criterios				
	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	...	C <sub>N</sub>
Alternativas	W <sub>1</sub>	W <sub>2</sub>	W <sub>3</sub>	...	W <sub>N</sub>
A <sub>1</sub>	a <sub>11</sub>	a <sub>12</sub>	a <sub>13</sub>	...	a <sub>1N</sub>
A <sub>2</sub>	a <sub>21</sub>	a <sub>22</sub>	a <sub>23</sub>	...	a <sub>2N</sub>
A <sub>3</sub>	a <sub>31</sub>	a <sub>32</sub>	a <sub>33</sub>	...	a <sub>3N</sub>
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
A <sub>M</sub>	a <sub>M1</sub>	a <sub>M2</sub>	a <sub>M3</sub>	...	a <sub>MN</sub>

Tal como se ha aplicado en el método AHP la preferencia final,  $P_i$ , de la alternativa  $A_i$  viene dada por la siguiente fórmula:

$$P_i = \sum_{j=1}^N a_{ij} W_j \quad \text{para } i=1, 2, 3, \dots, M \quad (15)$$

Sin embargo, ahora el valor  $a_{ij}$  expresa el valor de la rentabilidad relativa de la alternativa  $A_i$  cuando se examina con el resto de las otras alternativas en función del criterio  $C_j$ . En el caso de maximización, la mejor alternativa es la que corresponde al valor más alto de  $P_i$ . El método AHP utiliza valores relativos en lugar de medidas absolutas de rendimiento. Los valores de rendimiento  $a_{ij}$  se normalizan, por lo que suman uno, cumpliéndose la siguiente relación en el caso AHP:

$$\sum_{i=1}^M a_{ij} = 1 \quad (16)$$

Para cualquier  $j = 1, 2, 3, \dots, N$ , por lo que se puede utilizar en problemas de toma de decisiones simples o multidimensionales.

#### **4.10.1.- Descripción de los dos principales problemas de análisis de sensibilidad**

El primer gran problema que se examina en este análisis de sensibilidad es la forma de determinar el criterio más crítico en la toma de decisiones anterior. El segundo gran problema examinado en este apartado es la forma de determinar la medida más crítica del rendimiento  $a_{ij}$  cuando se utiliza el método AHP.

Intuitivamente, se puede pensar que el criterio más importante es el criterio que se corresponde con el peso más alto  $W_j$ . Sin embargo, esta noción de la criticidad puede ser engañosa, por lo que definiremos el criterio más crítico de dos formas alternativas. En la primera forma, el interés está en si la indicación de la mejor (top) alternativa cambia o no. En la segunda definición, el interés está en los cambios en la clasificación de cualquier alternativa.

En la noción anterior de la criticidad, el término *cambio más pequeño* puede definirse de dos maneras diferentes. La primera define el cambio más pequeño en términos absolutos. La segunda lo hace en términos relativos. Por ejemplo, supongamos que dos criterios  $C_1$  y  $C_2$  tienen pesos  $W_1 = 0,20$  y  $W_2 = 0,40$  respectivamente y, por otra parte, se supone que, cuando el primer peso se convierte en  $W_1' = 0,25$  entonces cambia el ranking actual de las alternativas. Del mismo modo, se supone que cuando el peso del segundo criterio se convierte en  $W_2' = 0,47$ , entonces cambia el ranking actual de las alternativas. En términos absolutos para ambos criterios, el primer criterio es el criterio más importante. Esto es cierto ya que el cambio de los pesos para  $C_1$  es  $|W_1 - W_1'| = 0,05$ , mientras que para  $C_2$  es  $|W_2 - W_2'| = 0,07$ . Es decir, para el primer criterio el cambio crítico es menor que para el segundo criterio.

Sin embargo, cuando se tiene en cuenta términos relativos, la imagen anterior cambia. En términos relativos, el cambio de los pesos para  $C_1$  es  $|W_1 - W_1'| \times 100/W_1 = 25$ , mientras que para  $C_2$  es  $|W_2 - W_2'| \times 100/W_2 = 17,5$ . Es decir, para el segundo criterio el

cambio relativo es menor que para el primer criterio. Por lo tanto, cuando se consideran los cambios relativos, el criterio más crítico es  $C_2$ .

En relación con los cambios en el ranking de las alternativas, se puede observar que se pueden tener dos perspectivas diferentes. En primer lugar, se puede estar interesado en ver cuándo un cambio en los datos actuales hace que cualesquiera dos alternativas reviertan su clasificación existente o, por el contrario, también es posible estar interesado en saber cuándo cambian sólo las mejores (top) alternativas.

Por lo tanto se pueden considerar un total de cuatro definiciones alternativas. Utilizando la terminología inglesa en los análisis de sensibilidad éstas se codifican como Absolute Any (AA), Absolute Top (AT), Percent Any (PA) y Percent Top (PT), que corresponden al valor absoluto de cualquiera de las alternativas, el valor absoluto de la alternativa situada en primer lugar, el valor porcentual de cualquiera de las alternativas y el valor porcentual de la alternativa situada en primer lugar, respectivamente. Este enfoque, sin embargo, podría ser engañoso. Después de todo, un cambio, de 0,02 no significa mucho a menos que a alguien también se le dé el valor original. Un cambio de 0,02 es muy diferente si el valor original fue de 0,07 o 0,70. Es decir, es más significativo utilizar los cambios relativos, tal y como se hace hincapié en esta tesis, aunque para obtenerlos es necesario calcular primero los cambios en términos absolutos.

La noción de cambio crítico mencionada arriba se utiliza tanto para determinar el criterio más crítico (problema 1) como para la determinación de la medida de rendimiento  $a_{ij}$  más crítica (problema 2).

#### **4.10.2.- Problema 1: determinación del criterio más crítico**

En este problema consideramos el caso de los cambios en los pesos actuales de los criterios de decisión. Antes de desarrollar la metodología vamos a introducir algunas definiciones necesarias para su desarrollo.

**Definición 1:**  $\delta_{k,i,j}$  ( $1 \leq i < j \leq M$  y  $1 \leq k \leq N$ ) denota el cambio mínimo en el peso actual  $W_k$  del criterio  $C_k$  tal que el ranking de alternativas  $A_i$  y  $A_j$  se invierten.

También se define como:

$$\delta'_{k,i,j} = \delta_{k,i,j} \times 100 / W_k \quad (17)$$

para cualquier  $1 \leq i < j \leq M$  y  $1 \leq k \leq N$ .

Es decir,  $\delta'_{k,i,j}$  expresa cambios en términos relativos. Como se verá más adelante (en el Teorema 1), es posible que el cambio sea inviable para un determinado par de alternativas y un criterio de decisión.

El criterio más crítico se define de dos maneras posibles, teniendo en cuenta las relaciones dadas en (14), la alternativa  $A_1$  se supone siempre que es la mejor alternativa. La primera de las siguientes definiciones (es decir, la definición 2) se aplica cuando se está interesado sólo en los cambios de la mejor alternativa, mientras que la segunda definición (es decir, la definición 3) se aplica cuando se está interesado en los cambios en la clasificación de cualquier alternativa.

**Definición 2:** El Percent Top (PT) de criterio crítico es el criterio que corresponde al menor valor de  $|\delta'_{k,i,j}|$  ( $1 \leq j \leq M$  y  $1 \leq k \leq N$ ).

**Definición 3:** El Percent Any (PA) de criterio crítico es el criterio que corresponde al menor valor de  $|\delta'_{k,i,j}|$  ( $1 \leq i < j \leq M$  y  $1 \leq k \leq N$ ).

**Definición 4:** El grado de criticidad del criterio  $C_k$ , denotado como  $D'_k$ , es la cantidad porcentual más pequeña que debe cambiar el valor actual de  $W_k$  de manera que la clasificación existente de las alternativas cambie a su vez. Es decir, se cumple la siguiente relación:

$$D'_k = \min_{1 \leq i < j \leq M} \{ \delta'_{k,i,j} \} \quad \text{para } N \geq k \geq 1 \quad (18)$$

**Definición 5:** El coeficiente de sensibilidad del criterio  $C_k$ , denotado como  $\text{sens}(C_k)$ , es el recíproco de su grado de criticidad. Es decir, se calcula de la siguiente manera:

$$\text{sens}(C_k) = \frac{1}{D'_k} \quad \text{para cualquier } N \geq k \geq 1 \quad (19)$$

Si el grado de criticidad es no factible (es decir, imposible cambiar cualquier rango de alternativa con cualquier cambio de peso), entonces al coeficiente de sensibilidad se le asigna el valor cero.

Las dos definiciones anteriores 4 y 5 se basan en los cambios en la clasificación de cualquier alternativa. Sin embargo, se puede estar interesado sólo en los cambios en el ranking de las mejores (top) alternativas. Por ejemplo, en un problema que involucra la compra de una casa, el foco está en la mejor casa y el ranking de todas las alternativas de casas puede ser de interés secundario. En casos como el anterior, uno puede querer utilizar modificaciones del grado de criticidad y los conceptos de los coeficientes de sensibilidad en el que los cambios sólo se definen en el ranking de la mejor alternativa. Se observa también que, puesto que  $D'_k$  es siempre menor que 1, se deduce que el valor de  $\text{sens}(C_k)$  es siempre mayor que 1.

Para indicar los cálculos que se deben llevar a cabo vamos a suponer que el decisor utiliza el método AHP y desea alterar el ranking existente de alternativas  $A_1$  y  $A_2$  modificando solamente el peso actual  $W_1$  del criterio  $C_1$ .

Como punto de partida, se verifica la relación  $P_1 > P_2$ . La cantidad  $\delta_{1,1,2}$  mínima, necesaria para revertir la clasificación actual de alternativas  $A_1$  y  $A_2$ , debe satisfacer las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned} \delta_{1,1,2} &< \frac{(P_2 - P_1)}{(a_{21} - a_{11})} && \text{si } (a_{21} > a_{11}) \\ \delta_{1,1,2} &> \frac{(P_2 - P_1)}{(a_{21} - a_{11})} && \text{si } (a_{21} < a_{11}) \end{aligned} \quad (20a)$$

Por otro lado, también se debe satisfacer la siguiente condición por el nuevo peso  $W_1^* = W_1 - \delta_{1,1,2}$  para ser factible:

$0 \leq W_1^*$ , lo que implica que

$0 \leq W_1 - \delta_{1,1,2}$ , lo que implica que

$$\delta_{1,1,2} \leq W_1 \quad (20b)$$

En esta evolución no se requiere tener  $W_i^* \leq 1$  porque estos pesos se normalizan de nuevo y suman uno.

De las relaciones anteriores (20a) y (20b), puede deducirse que, a veces, el valor  $\delta_{1,1,2}$  puede no tener un valor factible. En otras palabras, puede ser imposible revertir el ranking existente de las alternativas  $A_1$  y  $A_2$  mediante cambios en el peso actual de criterio  $C_1$ . Esta situación se produce cuando el valor del ratio es mayor que  $W_1$ :

$$\frac{(P_2 - P_1)}{(a_{21} - a_{11})} > W_1$$

De forma generalizada, 
$$\frac{(P_j - P_i)}{(a_{jk} - a_{ik})} > W_k \quad (21)$$

Estas consideraciones conducen a la prueba del siguiente teorema, que cubre el caso general, recordando que, actualmente, la relación  $P_i \geq P_j$ , para todos  $1 \leq i < j \leq M$  se supone que es cierta.

**Teorema 1:** Cuando se trabaja con el método AHP, la cantidad  $\delta'_{k,i,j}$  (para  $1 \leq i < j \leq M$  y  $1 \leq k \leq N$ ) que el peso actual  $W_k$  del criterio  $C_k$  necesita ser modificado (después de la normalización), para que la clasificación de las alternativas  $A_i$  y  $A_j$  se invierta, viene dada por:

$$\begin{aligned} \delta'_{k,i,j} &< \frac{(P_j - P_i)}{(a_{jk} - a_{ik})} \times \frac{100}{W_k} && \text{si } (a_{jk} > a_{ik}) \\ \delta'_{k,i,j} &> \frac{(P_j - P_i)}{(a_{jk} - a_{ik})} \times \frac{100}{W_k} && \text{si } (a_{jk} < a_{ik}) \end{aligned} \quad (22a)$$

Por otra parte, también se debe satisfacer la siguiente condición por el valor de  $\delta'_{k,i,j}$  para que sea factible:

$$\frac{(P_j - P_i)}{(a_{jk} - a_{ik})} \leq W_k \quad (22b)$$

De las consideraciones anteriores se deduce que si la alternativa  $A_i$  domina a la alternativa  $A_j$  (es decir,  $a_{ik} > a_{jk}$ , para todo  $k = 1, 2, \dots, N$ ), entonces, es imposible hacer que la alternativa  $A_j$  sea más preferida que la alternativa  $A_i$  cambiando los pesos de los criterios. También, un criterio  $C_k$  es un criterio robusto si todos los valores  $\delta'_{k,i,j}$  (para  $1 \leq i < j \leq M$  y  $1 \leq k \leq N$ ) asociados a ella son inviables. En otras palabras, si la ecuación (22b) no se cumple para todo  $i, j = 1, 2, 3, \dots, M$  por algún criterio  $C_k$  entonces, cualquier cambio en el peso de dicho criterio no afecta a la clasificación existente de cualquiera de las alternativas y por lo tanto este criterio es un criterio robusto que se puede quitar de su ulterior consideración.

Por lo tanto, si se está interesado en determinar el criterio más crítico, entonces todos los posibles valores  $\delta'_{k,i,j}$  (para  $1 \leq i < j \leq M$  y  $1 \leq k \leq N$ ) se deben calcular.

#### 4.10.3.- Problema 2: Determinación de la medida de rendimiento $a_{ij}$ más crítica

Para abordar el segundo problema introduciremos previamente las siguientes definiciones.

**Definición 6:** El valor  $\tau_{i,j,k}$  ( $1 \leq i < k \leq M$  y  $1 \leq j \leq N$ ) denota el valor umbral de  $a_{ij}$ , correspondiente al cambio mínimo que tiene que ocurrir en el valor actual de  $a_{ij}$  para que cambie el actual ranking entre las alternativas  $A_i$  y  $A_k$ .

Puesto que hay  $M$  alternativas, cada medida de rendimiento  $a_{ij}$  se asocia con un total de  $(M-1)$  valores umbral. De manera similar a lo anterior expuesto con respecto a la definición de los valores  $\delta'_{k,i,j}$ , se pueden considerar también los valores umbral expresados en términos relativos.

Estos valores umbrales relativos se denominan  $\tau'_{i,j,k}$ . Así:

$$\tau'_{i,j,k} = \tau_{i,j,k} \times 100/a_{ij}, \quad (23)$$

para cualquier  $1 \leq i < j \leq M$  y  $1 \leq k \leq N$

Por las mismas razones mencionadas anteriormente, cuando se tienen en cuenta los valores umbral, se emplean los definidos en términos relativos (es decir, los valores  $\tau'_{i,j,k}$ ). Teniendo en cuenta la noción de valor umbral anterior, la alternativa más sensible se define como la que está asociada con el valor umbral más pequeño. Como antes, se puede estar interesado en los cambios en el ranking de (sólo) la mejor alternativa, o en los cambios en el ranking de cualquier alternativa.

Como se mencionó anteriormente, hay  $(M-1)$  posibles valores umbral  $\tau'_{i,j,k}$  ( $i \neq k$ ,  $1 \leq i, k \leq M$ , y  $1 \leq j \leq N$ ) para cualquier  $a_{ij}$  (la forma de calcular estos valores umbral se indica más adelante en el teorema 2). Las tres definiciones siguientes se relacionan con la idea anterior de valores umbral  $\tau'_{i,j,k}$ . Se puede observar que definiciones análogas son posibles si se está interesado en cambios sólo en la alternativa superior (como en el caso anterior con las definiciones 4 y 5).

**Definición 7:** El grado de criticidad de la alternativa  $A_i$ , en función del criterio  $C_j$ , denominado  $\Delta'_{ij}$ , es la cantidad más pequeña (en %) que el valor actual de  $a_{ij}$  debe cambiar, de manera que la clasificación actual de la alternativa  $A_i$  cambie. Es decir,

$$\Delta'_{i,j} = \min_{k \neq i} \{ |\tau'_{i,j,k}| \} \quad \text{para todo } M \geq i \geq 1 \text{ y } N \geq j \geq 1 \quad (24)$$

**Definición 8:** La alternativa  $A_L$  es la alternativa más crítica si se asocia con el menor grado de criticidad. Es decir, si y sólo si se cumple la siguiente relación:

$$\Delta'_{L,j} = \min_{M \geq i \geq 1} \{ \min_{N \geq j \geq 1} \{ |\Delta'_{i,j}| \} \} \quad (25)$$

para todo  $M \geq k \geq 1$

**Definición 9:** El coeficiente de sensibilidad de la alternativa  $A_i$  en función del criterio  $C_j$ , denotado por  $\text{sens}(a_{ij})$ , es el recíproco de su grado de criticidad. Es decir, se define como:

$$\text{sens}(a_{i,j}) = \frac{1}{\Delta'_{i,j}} \quad \text{para todo } M \geq i \geq 1 \text{ y } N \geq j \geq 1 \quad (26)$$

Si el grado de criticidad no es factible, entonces el coeficiente de sensibilidad se fija igual a cero.

A partir de la definición 7, se deduce que cuanto menor sea el grado de criticidad  $\Delta'_{ij}$ , es más fácil que la clasificación de la alternativa  $A_i$  pueda cambiar. Por otra parte, la definición 9 indica que los cambios en la clasificación son más fáciles si los coeficientes de sensibilidad  $\text{sens}(a_{ij})$  son más altos. Finalmente, la definición 8, cuando se combina con las definiciones 7 y 9, indica que la alternativa más sensible es la que tiene el coeficiente de sensibilidad más alto.

**Teorema 2:** Cuando se utiliza el método AHP, el valor umbral  $\tau'_{i,j,k}$  (en %) que la medida de rendimiento de la alternativa  $A_i$  en función del criterio  $C_j$  tiene que ser modificada para que el ranking de alternativas  $A_i$  y  $A_k$  cambie, se calcula como sigue:

$$\tau'_{i,j,k} = \frac{(P_i - P_k)}{\{P_i - P_k + W_j(a_{k,j} - a_{i,j} + 1)\}} \times \frac{100}{a_{i,j}} \quad (27a)$$

Además, la siguiente condición también se debe satisfacer por el valor umbral para que sea factible:

$$\tau'_{i,j,k} \leq 100 \quad (27b)$$



**CAPÍTULO 5. RESULTADOS DE LA  
APLICACIÓN PRÁCTICA**

---

## **CAPÍTULO 5.- RESULTADOS DE LA APLICACIÓN PRÁCTICA**

En el capítulo anterior se realizó una descripción detallada de la metodología propuesta para el análisis de la criticidad en galerías de servicios. Al respecto, se ha considerado la combinación de dos técnicas multicriterio (MCDM) tales como AHP y VIKOR para mejorar o facilitar la toma de decisiones en la elección de las mejores políticas de seguridad en dichas galerías.

Hasta el presente, tanto AHP como VIKOR no se han aplicado en el análisis de criticidad en las galerías de servicios. Por lo tanto, es necesaria la validación de esta metodología a través de una aplicación real. Se ha aplicado la metodología propuesta para el análisis de la criticidad y amenazas a las galerías de servicios de la Universidad Politécnica de Valencia.

### **5.1. Aplicación de la técnica multicriterio AHP**

Como se mencionó en los capítulos 3 y 4, la toma de decisiones multicriterio implica la participación de expertos o decisores en diferentes momentos del proceso de análisis de decisión. Al respecto, en esta Tesis Doctoral la intervención de los expertos se limita a la estimación de preferencias de los criterios y alternativas planteados utilizando la metodología Delphi y una escala de colores para las respuesta según se haya considerado la criticidad de las galerías de servicios en relación a un impacto frente a otro (criterios) y a una amenaza frente a otra (alternativas). Tal como se ha indicado en el apartado anterior, se han elaborado las encuestas donde se ha preguntando siempre la criticidad de un ítem frente a otro, es decir por parejas de ítems para reducir la complejidad, obteniendo unos resultado de tipo cualitativo para las comparaciones realizadas.

Los expertos consultados corresponden a distintos grupos, los cuales se han clasificado en académicos, encargados y operarios de mantenimiento en las galerías de servicio. En total se ha consultado a un grupo formado por 10 expertos.

Para la metodología multicriterio utilizada AHP (metodología explicada detalladamente en el capítulo 4) la estimación de la preferencia debe realizarse de forma cuantitativa, para ello, las preferencias expresadas por los decisores se presentan con números utilizando la escala fundamental de Saaty, es decir, se han traducido los resultados cualitativos de las encuestas a resultados cuantitativos utilizando dicha escala, para poder obtener, utilizando la metodología AHP, en las estimaciones de los impactos y amenazas, una agregación correspondiente a una solución de consenso.

### 5.1.1. Obtención de la criticidad con respecto a los impactos

La Tabla 11 recoge las respuestas de los expertos a las encuestas sobre los impactos utilizando la escala de colores menciona. Después de aplicar la escala de Saaty para obtener los resultados cuantitativos de cada experto (Tabla 12), se ha hecho la media geométrica para agregar los resultados y utilizarlos como entradas en la matriz de comparaciones pareadas de criterios (impactos).

La matriz obtenida de comparaciones pareadas de los criterios (impactos) es:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0,5213 & 0,1568 & 0,2038 & 0,5486 & 0,2142 \\ 1,9184 & 1 & 0,2028 & 0,4670 & 1,5518 & 0,6444 \\ 6,3794 & 4,9076 & 1 & 2,6332 & 6,3227 & 1,7321 \\ 4,9076 & 2,1411 & 0,6123 & 1 & 3,5613 & 1,6332 \\ 1,8228 & 0,6444 & 0,1582 & 0,2808 & 1 & 0,2331 \\ 4,6689 & 1,5518 & 0,5774 & 0,6123 & 4,2896 & 1 \end{bmatrix}$$

donde  $a_{ij}$  representa la comparación entre el elemento  $i$  y el elemento  $j$  a partir de los valores de la escala fundamental tras aplicar la media geométrica, tal como se ha indicado anteriormente.

Podemos observar que la matriz anterior cumple con las propiedades de reciprocidad, homogeneidad y consistencia.

**Tabla 11.-** Respuestas y media geométrica de las preferencias del panel de expertos para la criticidad en los impactos.

	Cuestionario Delphi 1	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Media geom.
	Pareja de impactos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
<b>Q1</b>	<b>IIN vs. IIL</b>	MN	MN	SN	IC	IC	SN	SN	IC	IC	IC	0,5213
<b>Q2</b>	<b>IIN vs. IPC</b>	XN	XN	XN	MN	FN	MN	MN	MN	FN	MN	0,1568
<b>Q3</b>	<b>IIN vs. IEG</b>	SN	SN	SN	FN	FN	FN	FN	MN	MN	MN	0,2038
<b>Q4</b>	<b>IIN vs. IAM</b>	IC	IC	IC	IC	IC	SN	SN	SN	SN	MN	0,5486
<b>Q5</b>	<b>IIN vs. INL</b>	MN	MN	MN	MN	MN	MN	MN	FN	SN	SN	0,2142
<b>Q6</b>	<b>IIL vs. IPC</b>	MN	MN	MN	SN	FN	SN	SN	FN	FN	FN	0,2038
<b>Q7</b>	<b>IIL vs. IEG</b>	IC	IC	IC	SN	SN	SN	SN	IC	MN	MN	0,4670
<b>Q8</b>	<b>IIL vs. IAM</b>	LC	LC	LC	LC	LC	SN	SN	IC	IC	LC	1,5518
<b>Q9</b>	<b>IIL vs. INL</b>	SN	SN	SN	SN	SN	IC	IC	IC	IC	LC	0,6444
<b>Q10</b>	<b>IPC vs. IEG</b>	MC	LC	LC	LC	LC	IC	IC	IC	IC	SN	1,6332
<b>Q11</b>	<b>IPC vs. IAM</b>	FC	FC	MC	XC	XC	FC	FC	FC	LC	MC	6,3227
<b>Q12</b>	<b>IPC vs. INL</b>	IC	IC	LC	LC	LC	LC	SN	LC	LC	IC	1,7321
<b>Q13</b>	<b>IEG vs. IAM</b>	MC	MC	MC	MC	MC	MC	FC	LC	MC	MN	3,5613
<b>Q14</b>	<b>IEG vs. INL</b>	IC	IC	LC	LC	LC	SN	MC	LC	IC	IC	1,6332
<b>Q15</b>	<b>IAM vs. INL</b>	MN	MN	MN	SN	SN	MN	MN	MN	MN	SN	0,2331

**Tabla 12.-** Aplicación de la escala fundamental de Saaty a las respuestas de los expertos (impactos).

	<b>Cuestionario Delphi 1</b>	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	<b>Experto</b>
	Pareja de impactos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Q1</b>	<b>IIN vs. IIL</b>	0,2000	0,2000	0,3333	1,0000	1,0000	0,3333	0,3333	1,0000	1,0000	1,0000
<b>Q2</b>	<b>IIN vs. IPC</b>	0,1111	0,1111	0,1111	0,2000	0,1429	0,2000	0,2000	0,2000	0,1429	0,2000
<b>Q3</b>	<b>IIN vs. IEG</b>	0,3333	0,3333	0,3333	0,1429	0,1429	0,1429	0,1429	0,2000	0,2000	0,2000
<b>Q4</b>	<b>IIN vs. IAM</b>	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,2000
<b>Q5</b>	<b>IIN vs. INL</b>	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000	0,1429	0,3333	0,3333
<b>Q6</b>	<b>IIL vs. IPC</b>	0,2000	0,2000	0,2000	0,3333	0,1429	0,3333	0,3333	0,1429	0,1429	0,1429
<b>Q7</b>	<b>IIL vs. IEG</b>	1,0000	1,0000	1,0000	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	1,0000	0,2000	0,2000
<b>Q8</b>	<b>IIL vs. IAM</b>	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	0,3333	0,3333	1,0000	1,0000	3,0000
<b>Q9</b>	<b>IIL vs. INL</b>	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	3,0000
<b>Q10</b>	<b>IPC vs. IEG</b>	5,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,3333
<b>Q11</b>	<b>IPC vs. IAM</b>	7,0000	7,0000	5,0000	9,0000	9,0000	7,0000	7,0000	7,0000	3,0000	5,0000
<b>Q12</b>	<b>IPC vs. INL</b>	1,0000	1,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	0,3333	3,0000	3,0000	1,0000
<b>Q13</b>	<b>IEG vs. IAM</b>	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	7,0000	3,0000	5,0000	0,2000
<b>Q14</b>	<b>IEG vs. INL</b>	1,0000	1,0000	3,0000	3,0000	3,0000	0,3333	5,0000	3,0000	1,0000	1,0000
<b>Q15</b>	<b>IAM vs. INL</b>	0,2000	0,2000	0,2000	0,3333	0,3333	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000	0,3333

Para sintetizar los juicios hechos en las comparaciones en pares tenemos que hacer alguna tarea de ponderación y suma para que nos dé un número único que indique la prioridad de cada elemento. Vamos, por lo tanto, a calcular el vector propio de la matriz de comparaciones pareadas, aplicando el método de las potencias, tal como se ha indicado en el apartado 4.

El vector propio  $\omega$  de la matriz A determina la criticidad relativa de cada impacto individual, siendo:

$$\omega = \begin{bmatrix} 0,0455 \\ 0,0968 \\ 0,3683 \\ 0,2343 \\ 0,0618 \\ 0,1934 \end{bmatrix}$$

Ahora debemos de conocer hasta dónde llega la consistencia, ya que no es deseable que los juicios parezcan aleatorios. Luego el paso previo al cálculo del vector propio debería ser la verificación de la consistencia de las matrices de comparaciones pareadas.

Utilizamos el ratio de consistencia (CR) como el principal indicador del ranking de consistencia, tal como se ha indicado al explicar el método AHP. El CR se obtiene dividiendo el índice de consistencia (CI) por el índice de consistencia aleatoria (RCI) según la ecuación (4).

Se debe evaluar el máximo valor propio ( $\lambda_{\max}$ ) de la matriz de comparación por pares normalizada ( $A_N$ ) para obtener el CI. Así pues de la matriz de comparaciones pareadas para los impactos, se ha sumado las columnas y dividido por la suma obteniendo la siguiente matriz normalizada:

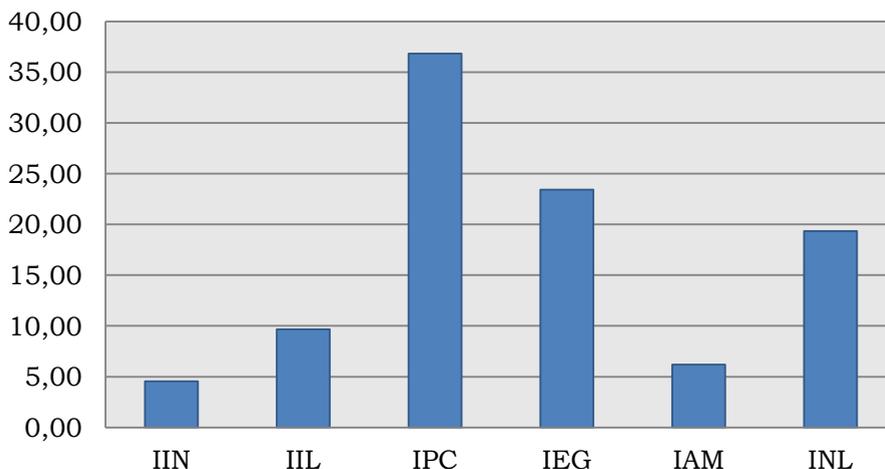
$$A_N = \begin{bmatrix} 0,048 & 0,048 & 0,058 & 0,049 & 0,032 & 0,039 \\ 0,093 & 0,093 & 0,075 & 0,111 & 0,090 & 0,118 \\ 0,308 & 0,456 & 0,369 & 0,389 & 0,366 & 0,317 \\ 0,237 & 0,199 & 0,226 & 0,238 & 0,206 & 0,299 \\ 0,088 & 0,060 & 0,058 & 0,067 & 0,058 & 0,043 \\ 0,226 & 0,144 & 0,213 & 0,146 & 0,248 & 0,183 \end{bmatrix}$$

La Tabla 13 muestra la clasificación de criticidad y el análisis de la consistencia llevado a cabo. Se observa que el ratio de consistencia (CR) es menor del 10% indicado en la Tabla 4 para un tamaño de matriz igual a 6, por lo tanto los juicios realizados son consistentes.

**Tabla 13.-** Vector de criticidad y análisis de consistencia de la matriz de comparaciones pareadas para los impactos.

	<b>IIN</b>	<b>IIL</b>	<b>IPC</b>	<b>IEG</b>	<b>IAM</b>	<b>INL</b>	<b>Vector de criticidad</b>
<b>IIN</b>	1,0000	0,5213	0,1568	0,2038	0,5486	0,2142	0,0455
<b>IIL</b>	1,9184	1,0000	0,2038	0,4670	1,5518	0,6444	0,0968
<b>IPC</b>	6,3794	4,9076	1,0000	1,6332	6,3227	1,7321	0,3683
<b>IEG</b>	4,9076	2,1411	0,6123	1,0000	3,5613	1,6332	0,2343
<b>IAM</b>	1,8228	0,6444	0,1582	0,2808	1,0000	0,2331	0,0618
<b>INL</b>	4,6689	1,5518	0,5774	0,6123	4,2896	1,0000	0,1934
	$\lambda_{\max} = 6,0865$		CI = 0,0173		CR = 0,0248 < 0,1 OK		

Del vector propio obtenido observamos que la mayor criticidad de las galerías de servicios en relación a los impactos, corresponde al impacto en la población de la comunidad (IPC) seguido por el de los empleados de las galerías de servicios (IEG) y los negocios locales (INL), tal como queda reflejado también en la siguiente gráfica de los pesos obtenidos en tanto por cien para los impactos (Figura 12). Así pues, las consecuencias de un posible evento en las galerías de servicios tendrían su mayor efecto en la población de la comunidad.



**Figura 12.-** Criticidad de cada impacto en la galería de servicios analizada.

### 5.1.2.- Clasificación de las amenazas usando matrices de comparaciones pareadas

El siguiente paso es evaluar cuán importante son las amenazas con respecto a cada impacto. Con este fin, se evalúa el segundo cuestionario que se envió a los expertos, tal como se ha indicado en el capítulo anterior. Dado que las respuestas son cualitativas, con código de colores, debemos de convertirlas a una escala AHP utilizando la tabla 9, igual que se ha hecho en el cuestionario anterior para la criticidad de las galerías de servicios en relación a los impactos (ver Tablas 14 a 25). A continuación se construirá una matriz de comparaciones por pares de las amenazas utilizando la media geométrica de los expertos.

**Tabla 14.-** Respuestas y media geométrica de las preferencias del panel de expertos en la comparación entre amenazas respecto al Impacto en la Infraestructura Nacional (IIN).

	Cuestionario Delphi 1	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Media geom.
	Pareja de amenazas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
C1 IIN	ED vs. CC	LC	LC	LC	LC	LC	MC	MC	MC	MC	LC	3,6801
C1 IIN	ED vs. TE	LN	LN	LN	LN	LN	MN	MN	MN	MN	MN	0,2582
C1 IIN	ED vs. AV	IC	IC	IC	IC	IC	LN	LN	LN	LN	LN	0,5774
C1 IIN	ED vs. VA	IC	IC	IC	IC	IC	LC	LC	LC	LC	LN	1,3904
C1 IIN	ED vs. XU	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	MC	MC	MC	6,3279
C1 IIN	CC vs. TE	FN	FN	FN	FN	FN	FN	FN	XN	XN	XN	0,1325
C1 IIN	CC vs. AV	FN	FN	FN	FN	FN	FN	FN	MN	MN	MN	0,1580
C1 IIN	CC vs. VA	MN	MN	LN	LN	LN	LN	MN	MN	LN	LN	0,2717
C1 IIN	CC vs. XU	IC	IC	LN	LN	IC	IC	LC	LC	LC	LC	1,2457
C1 IIN	TE vs. AV	LN	IC	IC	IC	MC	LC	LC	IC	LC	LC	1,6332
C1 IIN	TE vs. VA	MC	MC	MC	MC	MC	FC	FC	FC	FC	LC	5,4355
C1 IIN	TE vs. XU	XC	XC	XC	XC	XC	XC	XC	XC	FC	MC	8,2756
C1 IIN	AV vs. VA	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	LC	MC	4,7510
C1 IIN	AV vs. XU	FC	FC	FC	FC	FC	FC	MC	MC	MC	FC	6,3279
C1 IIN	VA vs. XU	MC	MC	MC	MC	MC	LC	LC	LN	LC	MC	3,2719

**Tabla 15.-** Aplicación de la escala fundamental de Saaty a las respuestas de los expertos (comparación entre amenazas respecto al Impacto en la Infraestructura Nacional, IIN).

	<b>Cuestionario Delphi 2</b>	<b>Experto</b>	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto
	Pareja de amenazas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>C1 IIN</b>	<b>ED vs. CC</b>	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	3,0000
<b>C1 IIN</b>	<b>ED vs. TE</b>	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000
<b>C1 IIN</b>	<b>ED vs. AV</b>	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333
<b>C1 IIN</b>	<b>ED vs. VA</b>	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	0,3333
<b>C1 IIN</b>	<b>ED vs. XU</b>	7,0000	7,0000	7,0000	7,0000	7,0000	7,0000	7,0000	5,0000	5,0000	5,0000
<b>C1 IIN</b>	<b>CC vs. TE</b>	0,1429	0,1429	0,1429	0,1429	0,1429	0,1429	0,1429	0,1111	0,1111	0,1111
<b>C1 IIN</b>	<b>CC vs. AV</b>	0,1429	0,1429	0,1429	0,1429	0,1429	0,1429	0,1429	0,2000	0,2000	0,2000
<b>C1 IIN</b>	<b>CC vs. VA</b>	0,2000	0,2000	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,2000	0,2000	0,3333	0,3333
<b>C1 IIN</b>	<b>CC vs. XU</b>	1,0000	1,0000	0,3333	0,3333	1,0000	1,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000
<b>C1 IIN</b>	<b>TE vs. AV</b>	0,3333	1,0000	1,0000	1,0000	5,0000	3,0000	3,0000	1,0000	3,0000	3,0000
<b>C1 IIN</b>	<b>TE vs. VA</b>	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	7,0000	7,0000	7,0000	7,0000	3,0000
<b>C1 IIN</b>	<b>TE vs. XU</b>	9,0000	9,0000	9,0000	9,0000	9,0000	9,0000	9,0000	9,0000	7,0000	5,0000
<b>C1 IIN</b>	<b>AV vs. VA</b>	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	3,0000	5,0000
<b>C1 IIN</b>	<b>AV vs. XU</b>	7,0000	7,0000	7,0000	7,0000	7,0000	7,0000	5,0000	5,0000	5,0000	7,0000
<b>C1 IIN</b>	<b>VA vs. XU</b>	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	3,0000	3,0000	0,3333	3,0000	5,0000

**Tabla 16.-** Respuestas y media geométrica de las preferencias del panel de expertos en la comparación entre amenazas respecto al Impacto en la Infraestructura Local (IIL).

	Cuestionario Delphi 2	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Media geom.
	Pareja de amenazas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
<b>C2 IIL</b>	<b>ED vs. CC</b>	IC	MC	MC	MC	MC	LC	LC	FC	FC	FC	4,2515
<b>C2 IIL</b>	<b>ED vs. TE</b>	LN	LN	IC	IC	IC	IC	IC	IC	IC	IC	0,8027
<b>C2 IIL</b>	<b>ED vs. AV</b>	IC	IC	IC	IC	IC	IC	IC	LN	LN	LC	0,8960
<b>C2 IIL</b>	<b>ED vs. VA</b>	MC	MC	MC	MC	MC	MC	LC	LC	LC	LN	3,2719
<b>C2 IIL</b>	<b>ED vs. XU</b>	MC	FC	FC	FC	FC	XC	XC	FC	XC	MC	7,0569
<b>C2 IIL</b>	<b>CC vs. TE</b>	LN	LN	LN	LN	LN	MN	MN	MN	MN	MN	0,2582
<b>C2 IIL</b>	<b>CC vs. AV</b>	FN	FN	FN	FN	FN	MN	FN	MN	FN	FN	0,1528
<b>C2 IIL</b>	<b>CC vs. VA</b>	IC	IC	IC	LN	LN	LN	LN	LN	LN	LN	0,4635
<b>C2 IIL</b>	<b>CC vs. XU</b>	LC	LC	IC	IC	IC	LC	LC	LC	LC	LN	1,7321
<b>C2 IIL</b>	<b>TE vs. AV</b>	IC	IC	IC	IC	IC	IC	IC	LC	LC	LC	1,3904
<b>C2 IIL</b>	<b>TE vs. VA</b>	LC	LC	LC	LC	LC	LC	LC	IC	LN	LN	1,7321
<b>C2 IIL</b>	<b>TE vs. XU</b>	FC	FC	FC	FC	FC	XC	FC	MC	MC	FC	6,7110
<b>C2 IIL</b>	<b>AV vs. VA</b>	FC	FC	FC	FC	FC	MC	MC	MC	MC	LC	5,6215
<b>C2 IIL</b>	<b>AV vs. XU</b>	XC	XC	XC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	FC	7,5482
<b>C2 IIL</b>	<b>VA vs. XU</b>	LC	MC	MC	MC	MC	LC	LC	LN	LC	LC	2,9542

**Tabla 17.-** Aplicación de la escala fundamental de Saaty a las respuestas de los expertos (comparación entre amenazas respecto al Impacto en la Infraestructura Local, IIL).

	<b>Cuestionario Delphi 2</b>	<b>Experto</b>	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto
	Pareja de amenazas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>C2 IIL</b>	<b>ED vs. CC</b>	1,0000	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	3,0000	3,0000	7,0000	7,0000	7,0000
<b>C2 IIL</b>	<b>ED vs. TE</b>	0,3333	0,3333	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
<b>C2 IIL</b>	<b>ED vs. AV</b>	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,3333	0,3333	3,0000
<b>C2 IIL</b>	<b>ED vs. VA</b>	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	3,0000	3,0000	3,0000	0,3333
<b>C2 IIL</b>	<b>ED vs. XU</b>	5,0000	7,0000	7,0000	7,0000	7,0000	9,0000	9,0000	7,0000	9,0000	5,0000
<b>C2 IIL</b>	<b>CC vs. TE</b>	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000
<b>C2 IIL</b>	<b>CC vs. AV</b>	0,1429	0,1429	0,1429	0,1429	0,1429	0,2000	0,1429	0,2000	0,1429	0,1429
<b>C2 IIL</b>	<b>CC vs. VA</b>	1,0000	1,0000	1,0000	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333
<b>C2 IIL</b>	<b>CC vs. XU</b>	3,0000	3,0000	1,0000	1,0000	1,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	0,3333
<b>C2 IIL</b>	<b>TE vs. AV</b>	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	3,0000	3,0000	3,0000
<b>C2 IIL</b>	<b>TE vs. VA</b>	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	1,0000	0,3333	0,3333
<b>C2 IIL</b>	<b>TE vs. XU</b>	7,0000	7,0000	7,0000	7,0000	7,0000	9,0000	7,0000	5,0000	5,0000	7,0000
<b>C2 IIL</b>	<b>AV vs. VA</b>	7,0000	7,0000	7,0000	7,0000	7,0000	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	3,0000
<b>C2 IIL</b>	<b>AV vs. XU</b>	9,0000	9,0000	9,0000	7,0000	7,0000	7,0000	7,0000	7,0000	7,0000	7,0000
<b>C2 IIL</b>	<b>VA vs. XU</b>	3,0000	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	3,0000	3,0000	0,3333	3,0000	3,0000

**Tabla 18.-** Respuestas y media geométrica de las preferencias del panel de expertos en la comparación entre amenazas respecto al Impacto en la Población de la Comunidad (IPC).

	Cuestionario Delphi 2	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Media geom.
	Pareja de amenazas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
<b>C3 IPC</b>	<b>ED vs. CC</b>	FC	FC	FC	FC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	5,7203
<b>C3 IPC</b>	<b>ED vs. TE</b>	LN	LN	LN	IC	IC	IC	IC	LN	LC	IC	0,7192
<b>C3 IPC</b>	<b>ED vs. AV</b>	IC	IC	IC	IC	IC	LC	LC	LN	LN	MN	0,8513
<b>C3 IPC</b>	<b>ED vs. VA</b>	LC	LC	LC	LC	LC	MC	MC	MC	LN	LC	2,8071
<b>C3 IPC</b>	<b>ED vs. XU</b>	FC	FC	FC	FC	FC	FC	MC	MC	MC	FC	6,3279
<b>C3 IPC</b>	<b>CC vs. TE</b>	FN	FN	FN	FN	XN	XN	FN	MN	FN	FN	0,1405
<b>C3 IPC</b>	<b>CC vs. AV</b>	MN	MN	XN	XN	FN	MN	FN	XN	FN	FN	0,1466
<b>C3 IPC</b>	<b>CC vs. VA</b>	LN	LN	LN	LN	LN	LN	MN	MN	LN	LN	0,3010
<b>C3 IPC</b>	<b>CC vs. XU</b>	IC	IC	IC	IC	LC	LC	LC	LC	LC	LC	1,9332
<b>C3 IPC</b>	<b>TE vs. AV</b>	LC	LC	LC	LC	IC	IC	MC	MC	LC	LC	2,6673
<b>C3 IPC</b>	<b>TE vs. VA</b>	IC	IC	MC	MC	MC	LC	LC	MC	LN	IC	2,1247
<b>C3 IPC</b>	<b>TE vs. XU</b>	FC	FC	FC	FC	FC	FC	XC	XC	FC	MC	7,1173
<b>C3 IPC</b>	<b>AV vs. VA</b>	MC	MC	MC	MC	MC	MC	LC	LC	MC	MC	4,5144
<b>C3 IPC</b>	<b>AV vs. XU</b>	XC	XC	XC	XC	XC	MC	FC	FC	FC	FC	7,6746
<b>C3 IPC</b>	<b>VA vs. XU</b>	MC	MC	MC	MC	MC	MC	LC	LC	LC	LC	4,0760

**Tabla 19.-** Aplicación de la escala fundamental de Saaty a las respuestas de los expertos (comparación entre amenazas respecto al Impacto en la en la Población de la Comunidad, IPC).

	<b>Cuestionario Delphi 2</b>	<b>Experto</b>	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto
	Pareja de amenazas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>C3 IPC</b>	<b>ED vs. CC</b>	7,0000	7,0000	7,0000	7,0000	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000
<b>C3 IPC</b>	<b>ED vs. TE</b>	0,3333	0,3333	0,3333	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,3333	3,0000	1,0000
<b>C3 IPC</b>	<b>ED vs. AV</b>	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	3,0000	3,0000	0,3333	0,3333	0,2000
<b>C3 IPC</b>	<b>ED vs. VA</b>	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	5,0000	5,0000	5,0000	0,3333	3,0000
<b>C3 IPC</b>	<b>ED vs. XU</b>	7,0000	7,0000	7,0000	7,0000	7,0000	7,0000	5,0000	5,0000	5,0000	7,0000
<b>C3 IPC</b>	<b>CC vs. TE</b>	0,1429	0,1429	0,1429	0,1429	0,1111	0,1111	0,1429	0,2000	0,1429	0,1429
<b>C3 IPC</b>	<b>CC vs. AV</b>	0,2000	0,2000	0,1111	0,1111	0,1429	0,2000	0,1429	0,1111	0,1429	0,1429
<b>C3 IPC</b>	<b>CC vs. VA</b>	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,2000	0,2000	0,3333	0,3333
<b>C3 IPC</b>	<b>CC vs. XU</b>	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000
<b>C3 IPC</b>	<b>TE vs. AV</b>	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	1,0000	1,0000	5,0000	5,0000	3,0000	3,0000
<b>C3 IPC</b>	<b>TE vs. VA</b>	1,0000	1,0000	5,0000	5,0000	5,0000	3,0000	3,0000	5,0000	0,3333	1,0000
<b>C3 IPC</b>	<b>TE vs. XU</b>	7,0000	7,0000	7,0000	7,0000	7,0000	7,0000	9,0000	9,0000	7,0000	5,0000
<b>C3 IPC</b>	<b>AV vs. VA</b>	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	3,0000	3,0000	5,0000	5,0000
<b>C3 IPC</b>	<b>AV vs. XU</b>	9,0000	9,0000	9,0000	9,0000	9,0000	5,0000	7,0000	7,0000	7,0000	7,0000
<b>C3 IPC</b>	<b>VA vs. XU</b>	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000

**Tabla 20.-** Respuestas y media geométrica de las preferencias del panel de expertos en la comparación entre amenazas respecto al Impacto en los Empleados de la Galería de Servicios (IEG).

	Cuestionario Delphi 2	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Media geom.
	Pareja de amenazas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
<b>C4 IEG</b>	<b>ED vs. CC</b>	IC	IC	IC	IC	IC	LN	LN	LN	LN	IC	0,6444
<b>C4 IEG</b>	<b>ED vs. TE</b>	MN	MN	FN	LN	LN	LN	FN	FN	MN	FN	0,2038
<b>C4 IEG</b>	<b>ED vs. AV</b>	IC	IC	IC	IC	IC	LC	LC	LC	LC	MC	1,8228
<b>C4 IEG</b>	<b>ED vs. VA</b>	MN	MN	MN	MN	MN	MN	LN	LN	MN	MN	0,2215
<b>C4 IEG</b>	<b>ED vs. XU</b>	IC	IC	IC	LN	LC	LC	IC	LC	LC	IC	1,3904
<b>C4 IEG</b>	<b>CC vs. TE</b>	LN	LN	LN	LN	MN	LN	LN	MN	MN	MN	0,2717
<b>C4 IEG</b>	<b>CC vs. AV</b>	MC	MC	MC	MC	LC	LC	LC	FC	LC	MC	4,2154
<b>C4 IEG</b>	<b>CC vs. VA</b>	IC	IC	LN	LN	LN	LN	IC	IC	IC	LN	0,5774
<b>C4 IEG</b>	<b>CC vs. XU</b>	MC	MC	FC	MC	MC	LC	LC	MC	LC	FC	4,5882
<b>C4 IEG</b>	<b>TE vs. AV</b>	FC	FC	MC	FC	XC	XC	FC	FC	FC	FC	7,1173
<b>C4 IEG</b>	<b>TE vs. VA</b>	LC	LC	IC	IC	IC	IC	LC	IC	IC	LC	1,5518
<b>C4 IEG</b>	<b>TE vs. XU</b>	XC	XC	FC	XC	FC	FC	FC	FC	XC	FC	7,7403
<b>C4 IEG</b>	<b>AV vs. VA</b>	MN	MN	MN	LN	LN	MN	LN	MN	MN	LN	0,2453
<b>C4 IEG</b>	<b>AV vs. XU</b>	LC	IC	IC	IC	LC	LC	IC	IC	LC	IC	1,5518
<b>C4 IEG</b>	<b>VA vs. XU</b>	FC	FC	XC	FC	FC	FC	XC	FC	MC	XC	7,2984

**Tabla 21.-** Aplicación de la escala fundamental de Saaty a las respuestas de los expertos (comparación entre amenazas respecto al Impacto en los Empleados de la Galería de Servicios, IEG).

	<b>Cuestionario Delphi 2</b>	<b>Experto</b>	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto
	Pareja de amenazas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>C3 IPC</b>	<b>ED vs. CC</b>	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	1,0000
<b>C3 IPC</b>	<b>ED vs. TE</b>	0,2000	0,2000	0,1429	0,3333	0,3333	0,3333	0,1429	0,1429	0,2000	0,1429
<b>C3 IPC</b>	<b>ED vs. AV</b>	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	5,0000
<b>C3 IPC</b>	<b>ED vs. VA</b>	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000	0,3333	0,3333	0,2000	0,2000
<b>C3 IPC</b>	<b>ED vs. XU</b>	1,0000	1,0000	1,0000	0,3333	3,0000	3,0000	1,0000	3,0000	3,0000	1,0000
<b>C3 IPC</b>	<b>CC vs. TE</b>	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,2000	0,3333	0,3333	0,2000	0,2000	0,2000
<b>C3 IPC</b>	<b>CC vs. AV</b>	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	3,0000	3,0000	3,0000	7,0000	3,0000	5,0000
<b>C3 IPC</b>	<b>CC vs. VA</b>	1,0000	1,0000	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	1,0000	1,0000	1,0000	0,3333
<b>C3 IPC</b>	<b>CC vs. XU</b>	5,0000	5,0000	7,0000	5,0000	5,0000	3,0000	3,0000	5,0000	3,0000	7,0000
<b>C3 IPC</b>	<b>TE vs. AV</b>	7,0000	7,0000	5,0000	7,0000	9,0000	9,0000	7,0000	7,0000	7,0000	7,0000
<b>C3 IPC</b>	<b>TE vs. VA</b>	3,0000	3,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	3,0000	1,0000	1,0000	3,0000
<b>C3 IPC</b>	<b>TE vs. XU</b>	9,0000	9,0000	7,0000	9,0000	7,0000	7,0000	7,0000	7,0000	9,0000	7,0000
<b>C3 IPC</b>	<b>AV vs. VA</b>	0,2000	0,2000	0,2000	0,3333	0,3333	0,2000	0,3333	0,2000	0,2000	0,3333
<b>C3 IPC</b>	<b>AV vs. XU</b>	3,0000	1,0000	1,0000	1,0000	3,0000	3,0000	1,0000	1,0000	3,0000	1,0000
<b>C3 IPC</b>	<b>VA vs. XU</b>	7,0000	7,0000	9,0000	7,0000	7,0000	7,0000	9,0000	7,0000	5,0000	9,0000

**Tabla 22.-** Respuestas y media geométrica de las preferencias del panel de expertos en la comparación entre amenazas respecto al Impacto Ambiental (IAM).

	Cuestionario Delphi 2	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Media geom.
	Pareja de amenazas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
<b>C5 IAM</b>	<b>ED vs. CC</b>	IC	IC	IC	IC	IC	LC	LC	LC	MC	LN	1,4633
<b>C5 IAM</b>	<b>ED vs. TE</b>	FN	FN	FN	FN	FN	MN	MN	MN	MN	LN	0,1779
<b>C5 IAM</b>	<b>ED vs. AV</b>	MN	MN	MN	MN	MN	MN	FN	FN	FN	MN	0,1808
<b>C5 IAM</b>	<b>ED vs. VA</b>	LN	LN	LN	LN	LN	LN	LN	LN	LN	MN	0,3167
<b>C5 IAM</b>	<b>ED vs. XU</b>	MC	MC	MC	MC	MC	MC	LN	LC	LC	MC	3,4434
<b>C5 IAM</b>	<b>CC vs. TE</b>	FN	FN	FN	MN	MN	FN	FN	XN	FN	FN	0,1490
<b>C5 IAM</b>	<b>CC vs. AV</b>	FN	FN	MN	MN	MN	MN	FN	XN	MN	MN	0,1705
<b>C5 IAM</b>	<b>CC vs. VA</b>	MN	MN	LN	LN	LN	MN	MN	MN	LN	LN	0,2582
<b>C5 IAM</b>	<b>CC vs. XU</b>	IC	IC	LC	LC	IC	LC	LC	LC	IC	IC	1,7321
<b>C5 IAM</b>	<b>TE vs. AV</b>	LC	LC	IC	IC	IC	LC	IC	IC	LC	LC	1,7321
<b>C5 IAM</b>	<b>TE vs. VA</b>	MC	MC	IC	IC	IC	MC	IC	IC	MC	MC	2,2361
<b>C5 IAM</b>	<b>TE vs. XU</b>	XC	XC	XC	XC	XC	XC	FC	FC	XC	FC	8,3464
<b>C5 IAM</b>	<b>AV vs. VA</b>	LC	LC	IC	IC	IC	LC	IC	IC	LC	LN	1,3904
<b>C5 IAM</b>	<b>AV vs. XU</b>	FC	FC	FC	FC	FC	XC	XC	FC	FC	FC	7,3608
<b>C5 IAM</b>	<b>VA vs UX</b>	MC	MC	MC	MC	MC	MC	LC	MC	FC	MC	4,9136

**Tabla 23.-** Aplicación de la escala fundamental de Saaty a las respuestas de los expertos (comparación entre amenazas respecto al Impacto Ambiental, IAM).

	<b>Cuestionario Delphi 2</b>	<b>Experto</b>	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto
	Pareja de amenazas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>C5 IAM</b>	<b>ED vs. CC</b>	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	3,0000	3,0000	3,0000	5,0000	0,3333
<b>C5 IAM</b>	<b>ED vs. TE</b>	0,1429	0,1429	0,1429	0,1429	0,1429	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000	0,3333
<b>C5 IAM</b>	<b>ED vs. AV</b>	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000	0,1429	0,1429	0,1429	0,2000
<b>C5 IAM</b>	<b>ED vs. VA</b>	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,3333	0,2000
<b>C5 IAM</b>	<b>ED vs. XU</b>	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	0,3333	3,0000	3,0000	5,0000
<b>C5 IAM</b>	<b>CC vs. TE</b>	0,1429	0,1429	0,1429	0,2000	0,2000	0,1429	0,1429	0,1111	0,1429	0,1429
<b>C5 IAM</b>	<b>CC vs. AV</b>	0,1429	0,1429	0,2000	0,2000	0,2000	0,2000	0,1429	0,1111	0,2000	0,2000
<b>C5 IAM</b>	<b>CC vs. VA</b>	0,2000	0,2000	0,3333	0,3333	0,3333	0,2000	0,2000	0,2000	0,3333	0,3333
<b>C5 IAM</b>	<b>CC vs. XU</b>	1,0000	1,0000	3,0000	3,0000	1,0000	3,0000	3,0000	3,0000	1,0000	1,0000
<b>C5 IAM</b>	<b>TE vs. AV</b>	3,0000	3,0000	1,0000	1,0000	1,0000	3,0000	1,0000	1,0000	3,0000	3,0000
<b>C5 IAM</b>	<b>TE vs. VA</b>	5,0000	5,0000	1,0000	1,0000	1,0000	5,0000	1,0000	1,0000	5,0000	5,0000
<b>C5 IAM</b>	<b>TE vs. XU</b>	9,0000	9,0000	9,0000	9,0000	9,0000	9,0000	7,0000	7,0000	9,0000	7,0000
<b>C5 IAM</b>	<b>AV vs. VA</b>	3,0000	3,0000	1,0000	1,0000	1,0000	3,0000	1,0000	1,0000	3,0000	0,3333
<b>C5 IAM</b>	<b>AV vs. XU</b>	7,0000	7,0000	7,0000	7,0000	7,0000	9,0000	9,0000	7,0000	7,0000	7,0000
<b>C5 IAM</b>	<b>VA vs UX</b>	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	3,0000	5,0000	7,0000	5,0000

**Tabla 24.-** Respuestas y media geométrica de las preferencias del panel de expertos en la comparación entre amenazas respecto al Impacto en los Negocios Locales (INL).

	Cuestionario Delphi 2	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Media geom.
	Pareja de amenazas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
<b>C6 INL</b>	<b>ED vs. CC</b>	MC	MC	MC	MC	MC	MC	FC	MC	MC	MC	5,1711
<b>C6 INL</b>	<b>ED vs. TE</b>	IC	IC	IC	IC	IC	IC	IC	MC	LC	LN	1,1746
<b>C6 INL</b>	<b>ED vs. AV</b>	IC	IC	IC	IC	IC	LN	LN	MN	LN	LN	0,5486
<b>C6 INL</b>	<b>ED vs. VA</b>	MC	MC	MC	MC	LC	LC	LC	MC	LC	LC	3,8730
<b>C6 INL</b>	<b>ED vs. XU</b>	FC	FC	XC	MC	XC	FC	XC	FC	MC	FC	7,0569
<b>C6 INL</b>	<b>CC vs. TE</b>	MN	MN	MN	IC	MN	MN	MN	LN	LN	FN	0,2516
<b>C6 INL</b>	<b>CC vs. AV</b>	FN	FN	XN	XN	FN	MN	FN	XN	FN	FN	0,1370
<b>C6 INL</b>	<b>CC vs. VA</b>	FN	FN	XN	FN	XN	FN	MN	MN	FN	FN	0,1453
<b>C6 INL</b>	<b>CC vs. XU</b>	IC	IC	IC	IC	IC	IC	IC	IC	LC	LN	1,0000
<b>C6 INL</b>	<b>TE vs. AV</b>	LN	LN	IC	IC	IC	LN	IC	IC	LN	LN	0,5774
<b>C6 INL</b>	<b>TE vs. VA</b>	IC	IC	IC	IC	IC	LN	IC	IC	LN	LN	0,7192
<b>C6 INL</b>	<b>TE vs. XU</b>	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	LC	LN	3,6239
<b>C6 INL</b>	<b>AV vs. VA</b>	MC	MC	MC	MC	MC	MC	LC	IC	MC	LN	3,0852
<b>C6 INL</b>	<b>AV vs. XU</b>	XC	XC	XC	FC	FC	XC	FC	FC	MC	XC	7,6746
<b>C6 INL</b>	<b>VA vs. XU</b>	MC	MC	MC	MC	MC	LC	MC	MC	LC	IC	3,8433

**Tabla 25.-** Aplicación de la escala fundamental de Saaty a las respuestas de los expertos (comparación entre amenazas respecto al Impacto en los Negocios Locales, INL).

	<b>Cuestionario Delphi 2</b>	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	Experto	<b>Experto</b>
	Pareja de amenazas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>C6 INL</b>	<b>ED vs. CC</b>	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	7,0000	5,0000	5,0000	5,0000
<b>C6 INL</b>	<b>ED vs. TE</b>	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	5,0000	3,0000	0,3333
<b>C6 INL</b>	<b>ED vs. AV</b>	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,3333	0,3333	0,2000	0,3333	0,3333
<b>C6 INL</b>	<b>ED vs. VA</b>	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	3,0000	3,0000	3,0000	5,0000	3,0000	3,0000
<b>C6 INL</b>	<b>ED vs. XU</b>	7,0000	7,0000	9,0000	5,0000	9,0000	7,0000	9,0000	7,0000	5,0000	7,0000
<b>C6 INL</b>	<b>CC vs. TE</b>	0,2000	0,2000	0,2000	1,0000	0,2000	0,2000	0,2000	0,3333	0,3333	0,1429
<b>C6 INL</b>	<b>CC vs. AV</b>	0,1429	0,1429	0,1111	0,1111	0,1429	0,2000	0,1429	0,1111	0,1429	0,1429
<b>C6 INL</b>	<b>CC vs. VA</b>	0,1429	0,1429	0,1111	0,1429	0,1111	0,1429	0,2000	0,2000	0,1429	0,1429
<b>C6 INL</b>	<b>CC vs. XU</b>	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	3,0000	0,3333
<b>C6 INL</b>	<b>TE vs. AV</b>	0,3333	0,3333	1,0000	1,0000	1,0000	0,3333	1,0000	1,0000	0,3333	0,3333
<b>C6 INL</b>	<b>TE vs. VA</b>	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,3333	1,0000	1,0000	0,3333	0,3333
<b>C6 INL</b>	<b>TE vs. XU</b>	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	3,0000	0,3333
<b>C6 INL</b>	<b>AV vs. VA</b>	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	3,0000	1,0000	5,0000	0,3333
<b>C6 INL</b>	<b>AV vs. XU</b>	9,0000	9,0000	9,0000	7,0000	7,0000	9,0000	7,0000	7,0000	5,0000	9,0000
<b>C6 INL</b>	<b>VA vs. XU</b>	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	3,0000	5,0000	5,0000	3,0000	1,0000

Como en la sección anterior, se ha aplicado el método del vector propio para obtener el vector de prioridad, y se ha realizado el análisis de consistencia para cada caso. Los resultados de todas las evaluaciones de amenazas para cada impacto se muestran en las Tablas 26 a la 31. El último paso consiste en calcular la clasificación global de las amenazas. En primer lugar, se construye una matriz con los vectores que indican la importancia de las amenazas para cada impacto, matriz de decisión, tal como se muestra en la Tabla 32.

Finalmente, la clasificación global (véase Figura 13) se obtiene mediante la multiplicación entre la matriz amenazas vs. impactos y el vector de criticidad de los impactos.

**Tabla 26.-** Vector de criticidad y análisis de consistencia de la matriz de comparaciones pareadas para las amenazas con respecto al Impacto en la Infraestructura Nacional (IIN).

<b>IIN</b>	<b>ED</b>	<b>CC</b>	<b>TE</b>	<b>AV</b>	<b>VA</b>	<b>XU</b>	<b>Vector de criticidad</b>
<b>ED</b>	1,0000	3,6801	0,2582	0,5774	1,3904	6,3279	0,1465
<b>CC</b>	0,2717	1,0000	0,1325	0,1580	0,2717	1,2457	0,0397
<b>TE</b>	3,8730	7,5482	1,0000	1,6332	5,4355	8,2756	0,4088
<b>AV</b>	1,7321	6,3279	0,6123	1,0000	4,7510	6,3279	0,2751
<b>VA</b>	0,7192	3,6801	0,1840	0,2105	1,0000	3,2719	0,0957
<b>XU</b>	0,1580	0,8027	0,1208	0,1580	0,3056	1,0000	0,0342
$\lambda_{\max} = 6,1878$			CI = 0,0376		CR = 0,0303 < 0,1 OK		

**Tabla 27.-** Vector de criticidad y análisis de consistencia de la matriz de comparaciones pareadas para las amenazas con respecto al Impacto en la Infraestructura Local (IIL)

<b>IIL</b>	<b>ED</b>	<b>CC</b>	<b>TE</b>	<b>AV</b>	<b>VA</b>	<b>XU</b>	<b>Vector de criticidad</b>
<b>ED</b>	1,0000	4,2515	0,8027	0,8960	3,2719	7,0569	0,2456
<b>CC</b>	0,2352	1,0000	0,2582	0,1528	0,4635	1,7321	0,0534
<b>TE</b>	1,2457	3,8730	1,0000	1,3904	1,7321	6,7110	0,2594
<b>AV</b>	1,1161	6,5444	0,7192	1,0000	5,6215	7,5482	0,3111
<b>VA</b>	0,3056	2,1577	0,5774	0,1779	1,0000	2,9542	0,0960
<b>XU</b>	0,1417	0,5774	0,1490	0,1325	0,3385	1,0000	0,0344
$\lambda_{\max} = 6,1760$			CI = 0,0352		CR = 0,0284 < 0,1 OK		

**Tabla 28.-** Vector de criticidad y análisis de consistencia de la matriz de comparaciones pareadas para las amenazas con respecto al Impacto en la Población de la Comunidad (IPC).

<b>IPC</b>	<b>ED</b>	<b>CC</b>	<b>TE</b>	<b>AV</b>	<b>VA</b>	<b>XU</b>	<b>Vector de criticidad</b>
<b>ED</b>	1,0000	5,7203	0,7192	0,8513	2,8071	6,3279	0,2261
<b>CC</b>	0,1748	1,0000	0,1405	0,1466	0,3010	1,9332	0,0411
<b>TE</b>	1,3904	7,1173	1,0000	2,6673	2,1247	7,1173	0,3327
<b>AV</b>	1,1746	6,8234	0,3749	1,0000	4,5144	7,6746	0,2631
<b>VA</b>	0,3562	3,3227	0,4707	0,2215	1,0000	4,0760	0,1059
<b>XU</b>	0,1580	0,5173	0,1405	0,1303	0,2453	1,0000	0,0311
$\lambda_{\max} = 6,2740$			CI = 0,0548		CR = 0,0442 < 0,1 OK		

**Tabla 29.-** Vector de criticidad y análisis de consistencia de la matriz de comparaciones pareadas para las amenazas con respecto al Impacto en los Empleados de las Galerías de Servicios (IEG).

IEG	ED	CC	TE	AV	VA	XU	Vector de criticidad
<b>ED</b>	1,0000	0,6444	0,2038	1,8228	0,2215	1,3904	0,0771
<b>CC</b>	1,5518	1,0000	0,2717	4,2154	0,5774	4,5882	0,1553
<b>TE</b>	4,9076	3,6801	1,0000	7,1173	1,5518	7,7403	0,4026
<b>AV</b>	0,5486	0,2372	0,1405	1,0000	0,2453	1,5518	0,0521
<b>VA</b>	4,5144	1,7321	0,6444	4,0760	1,0000	7,2984	0,2716
<b>XU</b>	0,7192	0,2180	0,1292	0,6444	0,1370	1,0000	0,0414
$\lambda_{\max} = 6,1216$			CI = 0,0243		CR = 0,0196 < 0,1 OK		

**Tabla 30.-** Vector de criticidad y análisis de consistencia de la matriz de comparaciones pareadas para las amenazas con respecto al Impacto Medioambiental (IAM).

IAM	ED	CC	TE	AV	VA	XU	Vector de criticidad
<b>ED</b>	1,0000	1,4633	0,1779	0,1808	0,3167	3,4434	0,0719
<b>CC</b>	0,6834	1,0000	0,1490	0,1705	0,2582	1,7321	0,0508
<b>TE</b>	5,6215	6,7110	1,0000	1,7321	2,2361	8,3464	0,3775
<b>AV</b>	5,5311	5,8659	0,5774	1,0000	1,3904	7,3608	0,2785
<b>VA</b>	3,1572	3,8730	0,4472	0,7192	1,0000	4,9136	0,1876
<b>XU</b>	0,2904	0,5774	0,1198	0,1359	0,2035	1,0000	0,0336
$\lambda_{\max} = 6,1070$			CI = 0,0214		CR = 0,0173 < 0,1 OK		

**Tabla 31.-** Vector de criticidad y análisis de consistencia de la matriz de comparaciones pareadas para las amenazas con respecto al Impacto en los Negocios Locales (INL)

INL	ED	CC	TE	AV	VA	XU	Vector de criticidad
<b>ED</b>	1,0000	5,1711	1,1746	0,5486	3,8730	7,0569	0,2712
<b>CC</b>	0,1934	1,0000	0,2516	0,1370	0,1453	1,0000	0,0378
<b>TE</b>	0,8513	3,9748	1,0000	0,5774	0,7192	3,6239	0,1569
<b>AV</b>	1,8228	7,2984	1,7321	1,0000	3,0852	7,6746	0,3426
<b>VA</b>	0,2582	6,8818	1,3904	0,3241	1,0000	3,8433	0,1529
<b>XU</b>	0,1417	1,0000	0,2759	0,1303	0,2602	1,0000	0,0386
$\lambda_{\max} = 6,2859$			CI = 0,0572		CR = 0,0461 < 0,1 OK		

**Tabla 32.-** Matriz de amenazas vs. impactos

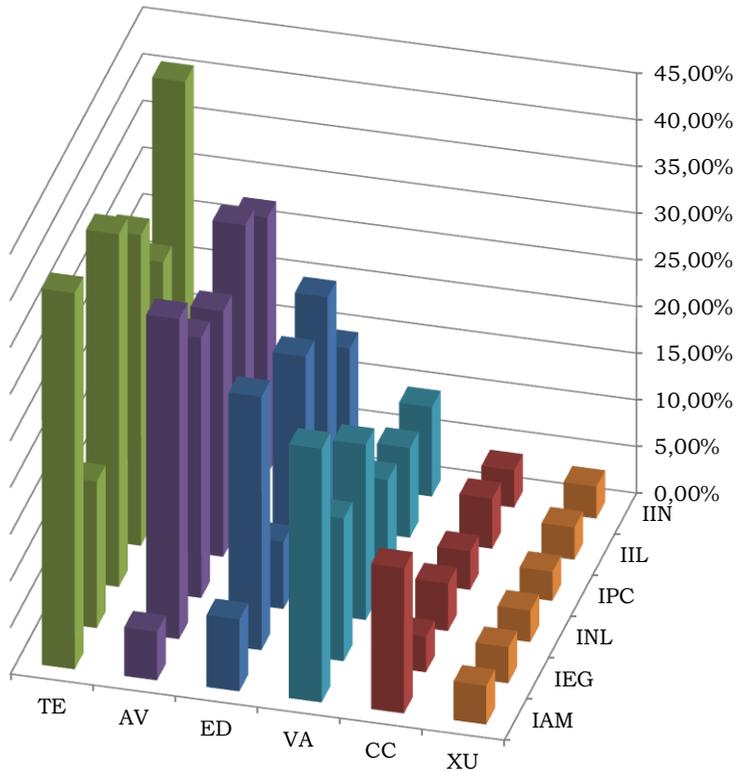
	IIN	IIL	IPC	IEG	IAM	INL
<b>ED</b>	0,1465	0,2456	0,2261	0,0771	0,0719	0,2712
<b>CC</b>	0,0397	0,0534	0,0411	0,1553	0,0508	0,0378
<b>TE</b>	0,4088	0,2594	0,3327	0,4026	0,3775	0,1569
<b>AV</b>	0,2751	0,3111	0,2631	0,0521	0,2785	0,3426
<b>VA</b>	0,0957	0,0960	0,1059	0,2716	0,1876	0,1529
<b>XU</b>	0,0342	0,0344	0,0311	0,0414	0,0336	0,0386

Obviamente, los resultados pueden variar dependiendo del caso que se está estudiando. Los pesos de cada amenaza para cada impacto se ilustran en la Figura 14. En nuestro caso, los terroristas (31,42%), activistas violentos (23,52%) y los empleados descontentos (18,86%) son las principales amenazas para el panel de expertos. Cada red de galerías de servicios debería desarrollar su propio análisis específico de amenazas, y las disposiciones de seguridad de las galerías de servicios deben ser planificadas usando estos resultados. Por ejemplo, limitar el número de entradas y salidas de personal y material, junto con apropiadas puertas cerradas en la entrada directa de los edificios servidos por galerías

laterales, son por lo general las contramedidas adecuadas para exploradores urbanos y vándalos. Por otra parte, procedimientos de identificación de entrada y salida más estrictos son adecuados para las amenazas de los empleados descontentos. Iluminación de protección para desalentar el acceso no autorizado sería adecuada para los vándalos y activistas violentos. Circuitos cerrados de televisión, vigilancia y sistemas de alarma podrían reducir la vulnerabilidad frente a terroristas, delincuentes comunes y vándalos. Las características y el número de personal de seguridad necesarios también dependerán del tipo de amenazas previstas. Por último, la autoridad responsable del sistema de galerías de servicios debería de controlar cuidadosamente la difusión de su estudio de amenazas, el cual podría ser útil para un adversario.



**Figura 13.-** Criticidad de cada amenaza en la galería de servicios analizada.



**Figura 14.-** Pesos de cada amenaza para cada impacto.

## 5.2.- Aplicación del método VIKOR

Siguiendo con la metodología propuesta en el capítulo 4, presentamos la matriz de decisión para determinar el mejor valor de  $f_j^*$  y el peor valor de  $f_j^-$  tal como se indica en la etapa 1 del método. Estos valores se recogen en la Tabla 33, donde se observa el máximo y el mínimo de cada fila, es decir, el máximo y mínimo de las amenazas para cada criterio.

**Tabla 33.-** Presentación de la matriz de decisión junto con los valores  $f^*$  y  $f^-$  para todas la amenazas.

	ED	CC	TE	AV	VA	XU	$f^*$	$f^-$
<b>IIN</b>	0,1465	0,0397	0,4088	0,2751	0,0957	0,0342	0,4088	0,0342
<b>IIL</b>	0,2456	0,0534	0,2594	0,3111	0,0960	0,0344	0,3111	0,0344
<b>IPC</b>	0,2261	0,0411	0,3327	0,2631	0,1059	0,0311	0,3327	0,0311
<b>IEG</b>	0,0771	0,1553	0,4026	0,0521	0,2716	0,0414	0,4026	0,0414
<b>IAM</b>	0,0719	0,0508	0,3775	0,2785	0,1876	0,0336	0,3775	0,0336
<b>INL</b>	0,2712	0,0378	0,1569	0,3426	0,1529	0,0386	0,3426	0,0378

Siguiendo con las etapas 2 y 3 y utilizando las ecuaciones (9), (10) y (11), obtenemos los valores de  $S_i$  (medida de utilidad o total satisfacción),  $R_i$  (medida de pesar o insatisfacción) y  $Q_i$  (valor de VIKOR para la alternativa  $i$ ) tal como se aprecia en la Tabla 34, junto con los pesos de los impactos y los valores  $\frac{f_j^* - x_{ij}}{f_j^* - f_j^-}$  para todas las amenazas.

**Tabla 34.-** Valores de  $S_i$ ,  $R_i$ , y  $Q_i$ , para las amenazas.

	Wc	ED	CC	TE	AV	VA	XU
<b>IIN</b>	0,0455	0,0318	0,0448	0,0000	0,0162	0,0380	0,0455
<b>IIL</b>	0,0968	0,0229	0,0901	0,0181	0,0000	0,0752	0,0968
<b>IPC</b>	0,3683	0,1302	0,3561	0,0000	0,0850	0,2769	0,3683
<b>IEG</b>	0,2343	0,2112	0,1604	0,0000	0,2274	0,0850	0,2343
<b>IAM</b>	0,0618	0,0549	0,0587	0,0000	0,0178	0,0341	0,0618
<b>INL</b>	0,1934	0,0453	0,1934	0,1178	0,0000	0,1204	0,1929
<b>Si</b>		0,4964	0,9035	0,1359	0,3464	0,6296	0,9995
<b>Ri</b>		0,2112	0,3561	0,1178	0,2274	0,2769	0,3683
<b>Qi</b>		0,3950	0,9200	0,0000	0,3406	0,6034	1,0000

Para el cálculo de los valores de  $Q_i$  hemos necesitado los mejores valores de  $S_i$  y  $R_i$  y que se reflejan en la Tabla 35. Además el valor de  $\gamma$ , peso de la estrategia asociada a la máxima utilidad del grupo, se ha

tomado igual a 0,5 implicando una estrategia de consenso entre ambas posturas.

**Tabla 35.-** Mejores y peores valores de  $S_i$  y  $R_i$  para las amenazas.

<b>S*</b>	0,1359	<b>S-</b>	0,9995
<b>R*</b>	0,1178	<b>R-</b>	0,3683

Siguiendo con la etapa 4 del método, vamos a clasificar las amenazas ordenandolas por los valores de S, R y Q en orden ascendente, tal como se indica en la Tabla 36.

**Tabla 36.-** Ranking de las amenazas en la gelería de servicios estudiada.

Amenazas	ED	CC	TE	AV	VA	XU
<b>Si</b>	3	5	1	2	4	6
<b>Ri</b>	2	5	1	3	4	6
<b>Qi</b>	3	5	1	2	4	6
Posición	1	2	3	4	5	6
<b>Si</b>	TE	AV	ED	VA	CC	XU
<b>Ri</b>	TE	ED	AV	VA	CC	XU
<b>Qi</b>	TE	AV	ED	VA	CC	XU

Por último, debemos comprobar las dos condiciones C1 y C2 (ventaja aceptable y estabilidad aceptable en la toma de decisiones respectivamente).

**Tabla 37.-** Condición 1: Ventaja aceptable.

<b>C1: <i>Ventaja aceptable</i></b>			
<b>QA(1)</b>	0,0000	<b>J</b>	6
<b>QA(2)</b>	0,3406	<b>DQ</b>	0,2000
<b>QA(2)-QA(1)</b>	0,3406		
<b>QA(2)-QA(1)&gt;DQ</b>	<b><i>sf</i></b>		

Tal como se observa en la Tabla 37, sí se satisface la condición de ventaja aceptable.

**Tabla 38.-** Condición 2: Estabilidad aceptable en la toma de decisiones.

---

**C1: *Estabilidad aceptable* Sí**

La mejor alternativa para Q debe ser también la mejor clasificada por S y R

---

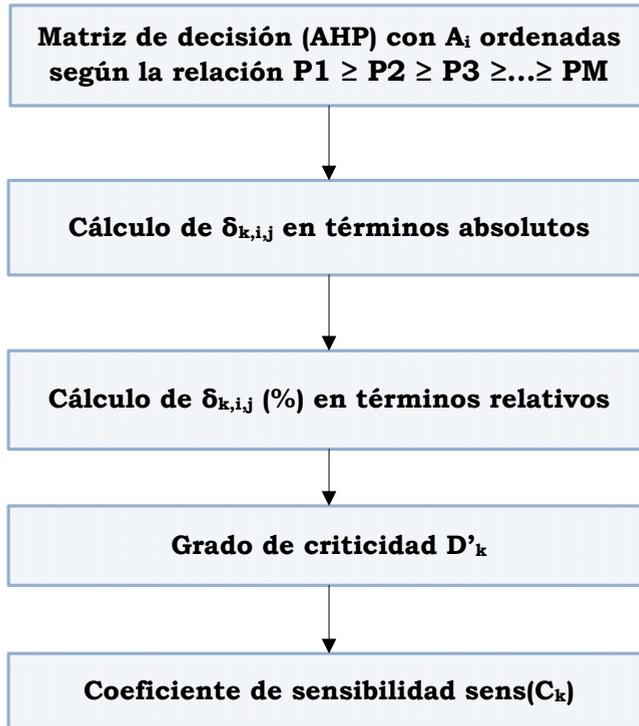
También se satisface la condición de estabilidad aceptable (ver Tabla 38), ya que la amenaza con mejor clasificación para Q, la de Terroristas (TE), también lo es para S y R.

### **5.3.- Análisis de sensibilidad**

Para abordar el análisis de sensibilidad de la aplicación práctica, tendremos en cuenta las seis alternativas propuestas correspondientes a las amenazas en las galerías de servicios y los seis criterios correspondientes a los impactos, tal como se ha explicado en la metodología propuesta del capítulo precedente. Así pues, en este capítulo las amenazas se denotarán por  $A_i$  ( $i=1,\dots,M$  siendo  $M=6$ ) y los impactos por  $C_j$  ( $C=1,\dots,N$  siendo  $N=6$ ). Siguiendo con la metodología propuesta para el análisis de sensibilidad, se analizarán los dos problemas que conforman dicha metodología.

#### **5.3.1.- Problema 1: determinación del criterio más crítico**

Para el análisis de este problema se seguirán los pasos propuestos en el capítulo anterior y que se resumen en el diagrama de la Figura 15. Como base de los cálculos a desarrollar, empezaremos por presentar la matriz de decisión obtenida en la aplicación del método AHP al caso de estudio, ver Tabla 39. En esta matriz las alternativas (amenazas)  $A_i$  han sido ordenadas de mayor a menor preferencia según la relación  $P_1 \geq P_2 \geq \dots \geq P_6$ , donde los  $P_i$  indican los pesos de las amenazas, tal como se explicó. Así, la amenaza con mayor peso es la de los Terroristas (TE), seguida por los Activistas Violentos (AV), tal como se puede observar en el ranking de las alternativas que recoge la Tabla 40.



**Figura 15.-** Pasos para determinación del criterio más crítico.

Calculamos el valor mínimo  $\delta_{k,i,j}$  que se necesita alterar el peso actual  $W_k$  del criterio  $C_k$  tal que el ranking de alternativas  $A_i$  y  $A_j$  se invierta, dichos valores están recogidos en las Tablas 41 y 42 en términos absolutos y relativos, obtenidos mediante la aplicación de las ecuaciones (21) y (22a) respectivamente. Los resultados de los valores denotados por "--" indican que el cambio no es posible al no cumplirse la relación (20b).

De la Tabla 41 podemos obtener el valor del Absolute-Top (AT), correspondiente al valor mínimo en términos absolutos para que el ranking de las mejores alternativas se invierta. Para ello hay que fijarse en el mínimo valor de  $\delta_{k,1,2}$  para  $K=1, \dots, 6$  es decir, el mínimo valor de la primera fila. En nuestro caso corresponde a  $\delta_{4,1,2}=0,2255$  lo que significa que para que se invierta la clasificación de las alternativas  $A_1$ (Terroristas, TE) y  $A_2$  (Activistas Violentos, AV) basta con que varíe su peso el criterio 4 (Impacto en los Empleados de la Galería de Servicio, IEG) como mínimo dicho valor. Del mismo modo

obtenemos de la Tabla 41 el valor del Absolute-Any (AA), tratándose ahora de averiguar el valor mínimo de cambio para todos los criterios y considerando todos los pares de alternativas. Dicho valor será por lo tanto el mínimo de las Tabla 41, que en nuestro caso se corresponde con  $\delta_{4,3,4} = |-0,1603| = 0,1603$ . Así pues, este es el mínimo valor de todos y corresponde al cambio absoluto que se necesita en el criterio 4 (IEG) para que las alternativas  $A_3$  (Empleados Descontentos, ED) y  $A_4$  (Vándalos, VA) inviertan su posición en el ranking.

Analizando ahora la Tabla 42, que resulta más interesante por contener los valores  $\delta_{k,i,j}$  en términos relativos, podemos obtener el Percent-Top (PT) y el Percent-Any (PA), igual que en el caso anterior pero ahora se corresponden con los cambios mínimos en términos relativos. Así pues, obtenemos que el Percent-Top (PT) se trataría del valor  $\delta_{4,1,2} = 96,2643\%$ , igual que antes este es el cambio mínimo porcentual necesario del criterio 4 (IEG) para que se inviertan las alternativas  $A_1$ (TE) y  $A_2$  (AV). Para el Percent-Any (PA) el valor es  $\delta_{4,3,4} = |-68,4307| = 68,4307$  y se cooresponde con el criterio 4 (IEG) y las alternativas  $A_3$  (ED) y  $A_4$  (VA).

Por último, de la Tabla 43 obtendremos los grados de criticidad,  $D'_k$ , y coeficientes de sensibilidad,  $\text{sens}(C_k)$ , de los 6 criterios (impactos). Siendo éstos los valores mínimos  $\delta_{k,i,j}$  (%) y su inversa para cada criterio respectivamente. De acuerdo con los resultados, el impacto más crítico es IEG por tener un mayor coeficiente de sensibilidad, seguidos por IPC, INL, IAM, IIL y IIN.

**Tabla 39.-** Matriz de decisión (AHP).

		IIN	IIL	IPC	IEG	IAM	INL
		C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>
W <sub>k</sub>		0,0455	0,0968	0,3683	0,2343	0,0618	0,1934
TE	A <sub>1</sub>	0,4088	0,2594	0,3327	0,4026	0,3775	0,1569
AV	A <sub>2</sub>	0,2751	0,3111	0,2631	0,0521	0,2785	0,3426
ED	A <sub>3</sub>	0,1465	0,2456	0,2261	0,0771	0,0719	0,2712
VA	A <sub>4</sub>	0,0957	0,0960	0,1059	0,2716	0,1876	0,1529
CC	A <sub>5</sub>	0,0397	0,0534	0,0411	0,1553	0,0508	0,0378
UX	A <sub>6</sub>	0,0342	0,0344	0,0311	0,0414	0,0336	0,0386

**Tabla 40.-** Ranking de las alternativas (amenazas)

Amenazas	Alternativas	P <sub>i</sub>	Posición
TE	A <sub>1</sub>	0,3142	1
AV	A <sub>2</sub>	0,2352	2
ED	A <sub>3</sub>	0,1886	3
VA	A <sub>4</sub>	0,1574	4
CC	A <sub>5</sub>	0,0689	5
UX	A <sub>6</sub>	0,0356	6

**Tabla 41.-** Valores de  $\delta_{k,i,j}$  en términos absolutos.

Par de alter.	C1	C2	C3	C4	C5	C6
A1-A2	--	-1,5310	--	0,2255	--	-0,4257
A1-A3	--	--	--	--	--	-1,0993
A1-A4	--	--	--	--	--	--
A1-A5	--	--	--	--	--	--
A1-A6	--	--	--	--	--	--
A2-A3	--	--	--	-1,8597	--	--
A2-A4	--	--	--	-0,3540	--	--
A2-A5	--	--	--	-1,6103	--	--
A2-A6	--	--	--	--	--	--
A3-A4	--	--	0,2595	-0,1603	-0,2694	--
A3-A5	--	--	--	-1,5305	--	--
A3-A6	--	--	--	--	--	--
A4-A5	--	--	--	--	--	--
A4-A6	--	--	--	--	--	--
A5-A6	--	--	--	--	--	-41,3118

Absolute-Top	0,2255
Absolute-Any	0,1603

**Tabla 42.-** Valores de  $\delta_{k,i,j}$  (%) en términos relativos.

Par de alter.	C1	C2	C3	C4	C5	C6
A1-A2	--	-1582,1027	--	96,2643	--	-220,1500
A1-A3	--	--	--	--	--	-568,4469
A1-A4	--	--	--	--	--	--
A1-A5	--	--	--	--	--	--
A1-A6	--	--	--	--	--	--
A2-A3	--	--	--	-793,7343	--	--
A2-A4	--	--	--	-151,1083	--	--
A2-A5	--	--	--	-687,2898	--	--
A2-A6	--	--	--	--	--	--
A3-A4	--	--	70,4633	-68,4307	-435,8350	--
A3-A5	--	--	--	-653,2319	--	--
A3-A6	--	--	--	--	--	--
A4-A5	--	--	--	--	--	--
A4-A6	--	--	--	--	--	--
A5-A6	--	--	--	--	--	-21362,7334

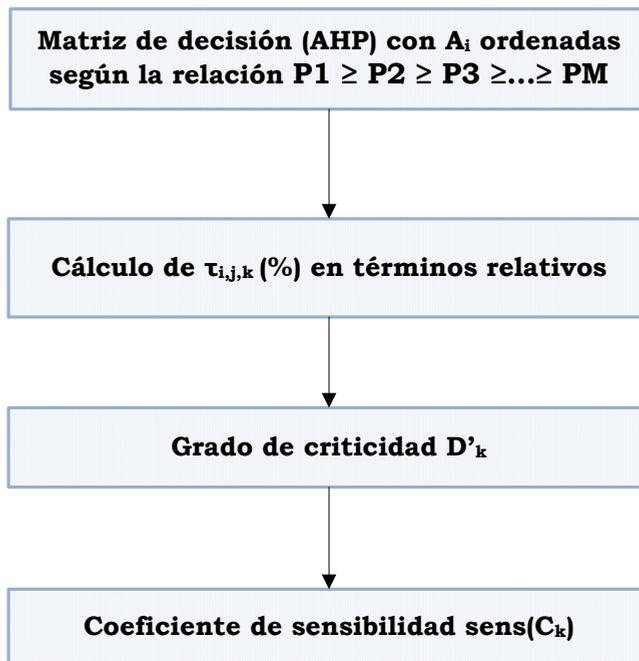
Percent-Top	96,2643
Percent-Any	68,4307

**Tabla 43.-** Grado de criticidad y coeficiente de sensibilidad de los impactos.

	IIN	IIL	IPC	IEG	IAM	INL
<b>D'<sub>k</sub></b>	--	1582,1027	70,4633	68,4307	435,835 0	220,150 0
<b>sens(C<sub>k</sub>)</b>	0,0000	0,0006	0,0142	0,0146	0,0023	0,0045
<b>Posición</b>	6	5	2	1	4	3

### 5.3.2.- Problema 2: Determinación de la medida de rendimiento $a_{ij}$ más crítica

Para el análisis de este problema seguiremos los pasos propuestos en el capítulo anterior y que se resumen en el siguiente esquema, ver Figura 16.

**Figura 16.-** Pasos para determinación de la medida de rendimiento  $a_{ij}$  más crítica.

Partiendo de la misma matriz de decisión de la Tabla 39, calcularemos el valor umbral  $\tau'_{i,j,k}$  en términos relativos mediante la ecuación (27a). Dichos valores se recogen en las Tabla 44. Así, por ejemplo si consideramos el valor umbral  $\tau'_{1,3,2}$  tenemos que es igual a 56,3559%, lo que significa que la medida de rendimiento  $a_{13}$  debe de disminuir el 56,3559% de su valor actual, es decir debe pasar al nuevo valor de  $(1 - 0,5635) \times 0,3327$  para que la alternativa  $A_2$  (Activistas Violentos, AV) sea más preferida que la alternativa  $A_1$  (Terroristas, TE). La interpretación del resto de entradas es similar. Nótese que los valores marcados por "--" corresponden a valores no posibles al no cumplir la condición (27b).

Avanzando con el análisis de este problema construimos la Tabla 45 de grados de criticidad  $\Delta'_{ij}$ , de la alternativa  $A_i$  en función del criterio  $C_j$  para cada valor de  $a_{ij}$ . En realidad esta tabla es un resumen de los valores umbrales mínimos de  $\tau_{i,j,k}$  para cada alternativa y criterio, que se encuentran además coloreados en la tabla anterior. De esta tabla se obtiene que las alternativas más críticas son  $A_3$  (Empleados Descontentos, ED) y  $A_4$  (Vándalos, VA), ya que corresponden con el valor mínimo de los grados de criticidad (de acuerdo con la Definición 8).

Realizando la inversa de los grados de criticidad obtenemos los coeficiente de sensibilidad  $\text{sens}(a_{ij})$ , que se recogen en la Tabla 46. Puede observarse como las alternativas más críticas ya mencionas tienen el coeficiente de sensibilidad más alto. Nótese que para las entradas no posibles (denotadas por "--" en la Tabla 45) el correspondiente coeficiente de sensibilidad es igual a 0.

**Tabla 44.-** Valores umbral  $\tau_{i,j,k}$  (%) en términos relativos.

Par de alter.	C1	C2	C3	C4	C5	C6
<b>A1-A2</b>	--	--	56,3559	84,9322	--	--
<b>A1-A3</b>	--	--	83,0390	--	--	--
<b>A1-A4</b>	--	--	--	--	--	--
<b>A1-A5</b>	--	--	--	--	--	--
<b>A1-A6</b>	--	--	--	--	--	--
<b>A2-A1</b>	--	-2001,9476	-95,4623	-640,0055	--	-294,4020
<b>A2-A3</b>	--	--	44,0873	--	--	60,0670
<b>A2-A4</b>	--	--	76,1103	--	--	96,7604
<b>A2-A5</b>	--	--	--	--	--	--
<b>A2-A6</b>	--	--	--	--	--	--
<b>A3-A1</b>	--	--	-197,0423	-881,0596	--	-1014,0353
<b>A3-A2</b>	-6650,5353	-334,8761	-61,3682	-331,9028	-2308,6433	-106,8035
<b>A3-A4</b>	--	--	38,8269	--	--	57,0133
<b>A3-A5</b>	--	--	--	--	--	--
<b>A3-A6</b>	--	--	--	--	--	--

**Tabla 44 (Cont.)**- Valores umbral  $\tau_{i,j,k}$  (%) en términos relativos.

Par de alter.	C1	C2	C3	C4	C5	C6
<b>A4-A1</b>	--	--	-501,6961	-533,4981	--	-2744,0647
<b>A4-A2</b>	--	-2029,6150	-210,5447	-272,1508	--	-333,5792
<b>A4-A3</b>	-1963,2089	-405,4890	-77,1886	-72,8827	-708,1440	-110,1883
<b>A4-A5</b>	--	--	--	--	--	--
<b>A4-A6</b>	--	--	--	--	--	--
<b>A5-A1</b>	--	--	-2590,0882	-3363,8728	--	--
<b>A5-A2</b>	--	--	-1424,7554	-2438,8364	--	-5106,3441
<b>A5-A3</b>	--	--	-919,3119	-800,5318	--	-2664,6853
<b>A5-A4</b>	--	-13374,9426	-709,0695	-329,4101	--	-1841,6117
<b>A5-A6</b>	--	--	--	89,1742	--	--
<b>A6-A1</b>	--	--	-4465,0787	-16711,1860	--	--
<b>A6-A2</b>	--	--	-2525,7588	-12956,3587	--	-9829,9760
<b>A6-A3</b>	--	--	-1714,8455	-4125,6647	--	-4647,5111
<b>A6-A4</b>	--	--	-1430,6272	-1769,4719	--	-3372,0209
<b>A6-A5</b>	-7909,8887	-1486,7531	-316,9285	-354,0706	-3367,6336	-540,6414

**Tabla 45.-** Grado de criticidad  $\Delta'_{ij}$  de la alternativa  $A_i$  en función del criterio  $C_j$  para cada valor de  $a_{ij}$ .

Criterios (Impactos)		IIN	IIL	IPC	IEG	IAM	INL
Alternativas (Amenazas)		C1	C2	C3	C4	C5	C6
<b>TE</b>	A1	--	--	56,3559(A2)	84,9322(A2)	--	--
<b>AV</b>	A2	--	2001,9476(A1)	44,0873(A3)	640,0055(A1)	--	60,0670(A3)
<b>ED</b>	A3	6650,5353(A2)	334,8761(A2)	38,8269(A4)	331,9028(A2)	2308,6433(A2)	57,0133(A4)
<b>VA</b>	A4	1963,2089(A3)	405,4890(A3)	77,1886(A3)	72,8827(A3)	708,1440(A3)	110,1883(A3)
<b>CC</b>	A5	--	13374,9426(A4)	709,0695(A4)	89,1742(A6)	--	1841,6117(A4)
<b>UX</b>	A6	7909,8887(A5)	1486,7531(A5)	316,9285(A5)	354,0706(A5)	3367,6336(A5)	540,6414(A5)

**Tabla 46.-** Coeficiente de sensibilidad  $sens(a_{ij})$  de la alternativa  $A_i$  en función del criterio  $C_j$  para cada valor de  $a_{ij}$ .

Criterios (Impactos)		IIN	IIL	IPC	IEG	IAM	INL
Alternativas (Amenazas)		C1	C2	C3	C4	C5	C6
<b>TE</b>	A1	0,0000	0,0000	0,0177(A2)	0,0118(A2)	0,0000	0,0000
<b>AV</b>	A2	0,0000	0,0005(A1)	0,0227(A3)	0,0016(A1)	0,0000	0,0166(A3)
<b>ED</b>	A3	0,0002(A2)	0,0030(A2)	0,0258(A4)	0,0030(A2)	0,0004(A2)	0,0175(A4)
<b>VA</b>	A4	0,0005(A3)	0,0025(A3)	0,0130(A3)	0,0137(A3)	0,0014(A3)	0,0091(A3)
<b>CC</b>	A5	0,0000	0,0001(A4)	0,0014(A4)	0,0112(A6)	0,0000	0,0005(A4)
<b>UX</b>	A6	0,0001(A5)	0,0007(A5)	0,0032(A5)	0,0028(A5)	0,0003(A5)	0,0018(A5)



## **CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES**

---

## CAPÍTULO 6.- CONCLUSIONES

En el capítulo 1 se ha realizado una introducción al tema de la importancia en materia de seguridad en las infraestructuras críticas. Extrapolando dicha importancia a las galerías de servicios, es necesaria una metodología de análisis en esta materia. Tal es el caso abordado en esta tesis. En el capítulo 2 se ha hecho una revisión del estado del arte de las galerías de servicios, abordando los riesgos externos e inherentes entre otros aspectos. El capítulo 3 recoge una revisión de los fundamentos que sustentan la teoría de decisión multicriterio, explicándose las técnicas de decisión multicriterio utilizadas en el análisis de criticidad y seguridad en las galerías de servicios. En el capítulo 4 se ha presentado una descripción detallada de la metodología propuesta. En este sentido, se han establecido el objetivo, los criterios y las alternativas considerados, estableciendo una jerarquía. A su vez, se han ampliado los contenidos vinculados con las técnicas multicriterio propuestas, AHP y VIKOR, así como el método Delphi utilizando un código de colores para las respuestas de los expertos. Finalmente, en el capítulo 5, se ha validado la propuesta metodológica mediante su aplicación a las galerías de servicios de la Universidad Politécnica de Valencia.

Los resultados obtenidos de la aplicación al caso real demuestran que la metodología propuesta es coherente para el análisis de criticidad y amenazas en las galerías de servicios. La combinación secuencial de las dos técnicas multicriterio, AHP y VIKOR, la primera para una estimación de los pesos de las preferencias de los decisores y la segunda para una solución de compromiso consistente en el ordenamiento de alternativas, permiten facilitar la toma de decisiones de una manera transparente, participativa y comprensible. Esto puede permitir a los responsables en seguridad tomar mejores decisiones.

Para el caso estudiado podemos observar que, según los juicios emitidos por los expertos, la amenaza en las galerías de servicios de mayor criticidad es la correspondiente a los Terroristas (TE), con un peso del 31,42% obtenido al aplicar AHP, seguida de los Activistas Violentos (AV) con un 23,52%, los Empleados Descontentos (ED) con un 18,86%, Vándalos (VA) con el 15,74%, Delincuentes de Cuello blanco y Comunes (CC) con el 6,89% y por último, la de

menor peso es la correspondiente a los Exploradores Urbanos (XU), con un peso del 3,5%. Si observamos los resultados obtenidos en la aplicación del método VIKOR al caso real, la solución de compromiso obtenida es un ranking de amenazas en el que la de los Terroristas ocupa el primer puesto, seguida de los Activistas Violentos, Empleados Descontentos, Vándalos, Delincuentes de Cuello blanco y Comunes, siendo la última en el ranking la de los Exploradores Urbanos. Así pues, con el AHP hemos asignado los pesos de las preferencias de las amenazas en función de la criticidad y con el método VIKOR hemos logrado un ordenamiento jerárquico de las mismas.

Así mismo, con el método AHP, hemos averiguado la criticidad de las galerías de servicios en relación a los posibles impactos, de modo que el Impacto en la Población de la Comunidad (IPC) es el que presenta una mayor criticidad ante cualquier ataque exitoso u otro evento adverso en la galería de servicios. A este impacto le sigue el Impacto en los Empleados de la Galería de servicios (IEG), el Impacto en los Negocios Locales (INL), el Impacto en la Infraestructura Local (IIL), el Impacto Ambiental (IAM) y por último el Impacto en la Infraestructura Nacional (IIN), tal como se muestra en la Figura 12.

Con el análisis de sensibilidad hemos obtenido que el criterio con mayor sensibilidad es el Impacto en los Empleados de la Galería de servicios (IEG), es decir, es el criterio de cuyo valor depende en mayor medida la clasificación obtenida de las amenazas.

La mayor contribución en esta tesis es la aplicación, por primera vez, de los métodos AHP y VIKOR para el análisis de la criticidad y seguridad en redes de galerías de servicios urbanas. Esta tesis ha permitido profundizar en algunos aspectos, pero todavía se deben incrementar los esfuerzos, como incluir en la metodología propuesta otras alternativas (amenazas) y criterios y subcriterios (impactos). La metodología se ha hecho para una red general de galerías de servicios, si hubiera alguna sección en particular cerca de una infraestructura o edificio crítico, debería realizarse un estudio especial de las medidas a llevar a cabo. Como líneas futuras se propone el ampliar la metodología de investigación a otras tipologías de infraestructuras sensibles.



## **CAPÍTULO 7. REFERENCIAS**

---

**CAPITULO 7.- REFERENCIAS**

- Alarcón, A. Ault, G. & Galloway, S. (2010). Multi-objective planning of distributed energy resources: A review of the state of the art. *Renewable and Sustainable Energy Review* 14 (5),1353-1366.
- ANSI Z535.1-2006 -R2011. (2011). Safety colors. American National Standards Institute, Inc.
- APWA (American Public Works Association). (1999). Color Code and Marking Guidelines, 4/1999.
- Armocost, R. L. & Hosseini, J. C. (1994). Identification of determinant attributes using the analytic hierarchy process. *Journal of the Academy of Marketing Science* 22 (4), 383-392.
- Ávila, R. (2000). El AHP (Proceso analítico Jerárquico) y su aplicación para determinar los usos de la tierra - El caso de Brasil. Proyecto regional “Información sobre tierras y aguas para un desarrollo agrícola sostenible” – FAO, Santiago de Chile-Chile.
- Aznar, J. & Gujarro, F. (2012). Nuevos métodos de valoración: modelos multicriterio. Universitat Politècnica de València.
- Bakker, K. (2012). Water Security: Research Challenges and Opportunities. *Science*, 337 (6097), 914–915.
- Belton, V. & Stewart, T. (2002). Multiple criteria decision analysis: An integrated approach. Kluwer Academic Publishers.
- Bilbao, A. & Pérez, B. (2006). Fuzzy compromise programming for portfolio selection. *Applied Mathematics and Computation* 173, 251-264.
- Calvo, V., Curiel, J. & Cantó, J. (2006). Ergonomic design of utility tunnels. X International Congress on Project Engineering. Valencia. AEIPRO.

- Calvo, V., Curiel, J. & Cantó, J. (2006). Risk assessment of urban utilidors. X International Congress on Project Engineering. Valencia. AEIPRO.
- Calvo, V., Curiel, J. & Cantó, J. (2009). Endpoints for occupational exposure to electromagnetic fields in utility tunnels. XIII International Congress on Project Engineering. Badajoz. AEIPRO.
- Canto-Perello, J. & Curiel Esparza, J. (2013). Assessing governance issues of urban utility tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology* 33 (1), 82-87.
- Canto-Perello, J. & Curiel-Esparza, J. (2003). Risks and potential hazards in utility tunnels for urban areas. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Municipal Engineer* 156 (1), 51-56.
- Canto-Perello, J. & Curiel-Esparza, J. (2001). Human factors engineering in utility tunnel design. *Tunnelling and Underground Space Technology* 16 (3), 211-215.
- Canto-Perello, J. & Curiel-Esparza, J. (2006). An analysis of utility tunnel viability in urban areas. *Civil Engineering and Environmental Systems* 23 (1), 11-19.
- Canto-Perello, J., Curiel-Esparza, J. & Calvo, V. (2009). Analysing utility tunnels and highway networks coordination dilemma. *Tunnelling and Underground Space Technology* 24 (2), 185-189.
- Canto-Perello, J., Curiel-Esparza, J. & Calvo, V. (2013). Criticality and threat analysis on utility tunnels for planning security policies of utilities in the urban underground space. *Expert Systems with Applications* 40, 4707-4714.
- Caponecchia, C. (2012). Relative risk perception for terrorism: implications for preparedness and risk communication. *Risk Analysis* 32 (9), 1524-1534.
- Çelen, A. & Yalçın, N. (2012). Performance assessment of Turkish electricity distribution utilities: An application of combined

- FAHP/TOPSIS/DEA methodology to incorporate quality of service. *Utilities Policy* 30, 1-13.
- Chatzimouratidis, A. & Pilavachi, P. (2009). Technological and sustainability evaluation of power plants using the Analytic Hierarchy Process. *Energy Policy* 37, 778-787.
- Chow, T.E. & Sadler, R. (2010). The consensus of local stakeholders and outside experts in suitability modelling for future camp development. *Landscape and Urban Planning* 94 (1), 9-19.
- Clark, R. M. (2014). Securing water and wastewater systems: global perspectives. *Water and Environment Journal* 28, 449-458
- Clark, R.M., Hakim, S. & Ostfeld, A. (2011). Securing Water and Wastewater Systems: An Overview. In Clark, R.M., Hakim, S. and Ostfeld, A. (eds). *Handbook of Water and Wastewater Systems Protection*. Springer-Science, New York, 1-25.
- Curiel-Esparza, J. & Canto-Perello, J. (2012). Understanding the major drivers for implementation of municipal sustainable policies in underground space. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology* 19 (6), 506-514.
- Dalkey, N., Helmer, O. (1963) An experimental application of the Delphi method to the use of experts. *Management Science* 9 (3), 458-467.
- Diakoulakis, D. & Grafakos, S. (2004). Externalities of energy: Extension of accounting framework and policy applications. Final report on work package 4.
- Dong, L., Fanxiang, M. & Qiang, F. (2009). Application of Analytic Hierarchy Process in Optimization election of Groundwater Artificial Recharge Methods in Sanjiang Plain. *IEEE Management and Service Science*.
- EC (European Commission). (2006). On a european programme for critical infrastructure protection. Brussels 786- final.

- Fenrick, S.A. & Getachew, L. (2012). Cost and reliability comparisons of underground and overhead power lines. *Utilities Policy* 20 (1), 31-37.
- Flament, M. (1999). *Glosario multicriterio*. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO).
- Freimer, M. & Yu, P. (1976). Some New Results on Compromise Solutions for Group Decision Problems, *Management Science* 22, 688-693.
- García, M. (2009). *Métodos para la comparación de alternativas mediante un sistema de ayuda a la decisión (S.A.D) y "Soft Computing"*. Tesis doctoral Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena-Colombia.
- Georgopoulou, E., Sarafidis, Y. & Diakoulaki, D. (1998). Design and implementation of a group DSS for sustaining renewable energies exploitation. *European Journal of Operational Research* 109, 483-500.
- Godet, M. & Durance, P. (2011). *La prospective stratégique, pour les entreprises et les territoires*, UNESCO, Dunod, Paris.
- Godet, M., Durance, P. & Gerber, A. (2006). *Strategic foresight, la prospective problems and methods*, Laboratoire d'Investigation en Prospective, Stratégie et Organisation, Paris.
- Gosh, D. N. et al. (2011). Analytic Hierarchy Process & TOPSIS Method to Evaluate Faculty Performance in Engineering Education. *UNIASCIT* 1 (2), 63-70.
- Gracht, H.A. (2012). Consensus measurement in Delphi studies, review and implications for future quality assurance, *Technological Forecasting and Social Change* 79 (8), 1525-1536.
- Güereca, L. (2006). *Desarrollo de una metodología para la valoración en el análisis de ciclo de vida aplicada en la gestión*

integral de residuos municipales. Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona-España.

Herwijnen, M. (2006). Multi-attribute value theory. Vrije Universiteit, Amsterdam.

HSPD3 (Homeland Security Presidential Directive 3). (2002). Homeland Security Advisory System. Washington.

Hwang, C. & Yoon, K. (1981). Multiple Attribute Decision Makings. In: Lecture notes in Economics and Mathematical Systems 186. Springer- Verlag, Berlin-Germany.

ICNIRP. (1998). Internacional Comision on Non Ionizing Radiation Protection. Guidelines for limiting exposure to time varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz).

Kaya, T. & Kahraman, C. (2011). Multicriteria decision making in energy planning using a modified fuzzy TOPSIS methodology. Expert Systems with applications 38, 6577-6585.

Keeney, R. & Raiffa, H. (1993). Decision with multiple objectives: Preferences and value trade-off. II edition, Cambridge University Press, Cambridge, GB.

Khezrian, M., Wan, W., Ibrahim, S. & Kalantari, A. (2011). Service selection based on VIKOR Method. International Journal of Research and Reviews in Computer Science 5(2), 1182-1186.

Landeta, J. (2002). El método Delphi: una técnica de previsión para la incertidumbre. Ariel social. Barcelona.

Lemley, J.R., Fthenakis, V.M. & Moskowitz, P.D. (2003). Security risk analysis for chemical process facilities. Process Safety Progress 22 (3), 153-162.

Li, H., Apostolakis, G.E., Gifun, J., VanSchalkwyk, W, Leite, S. & Barber, D. (2009). Ranking the risks from multiple hazards in a small community. Risk Analysis 29 (3), 438-456.

- Lilliestam, J. (2014). Vulnerability to terrorist attacks in European electricity decarbonisation scenarios: Comparing renewable electricity imports to gas imports. *Energy Policy* 66, 234–248.
- Linares, P. (1999). Integración de criterios medioambientales en procesos de decisión: Una aproximación multicriterio a la planificación integrada de recursos eléctricos. Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Madrid, Madrid-España.
- Linstone, H., Turoff, M. (1975). *The Delphi method: Techniques and applications*. ISBN 0201042940. Addison-Wesley Educational Publishers Inc.
- Liu, J. & Yang, W. (2012). Water Sustainability for China and Beyond. *Science*, 337, 649–650.
- Loken, E. (2007). Use of multicriteria decision analysis methods for energy planning problems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11, 1584-95.
- Manoliadis, O. (2002). Development of ecological indicators – a methodological framework using compromise programming. *Ecological Indicators* 2, 169-176.
- Martin-Utrillas, M., Reyes-Medina, M, Curiel-Esparza, J. & Canto-Perello, J. (2015). Hybrid method for selection of the optimal process of leachate treatment in waste treatment and valorization plants or landfills. *Clean Technologies and Environmental* 17, 873–885.
- Masuda, T. (1990). Hierarchical sensitivity analysis of the priorities used in Analytic Hierarchy Process. *Systems Science* 21 (2), 415-427.
- Miller, G.A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: some limits on our capacity for processing information. *The Psychological Review* 63 (1), 81-97.

- Mullins, D. (2006). Exploring change in the housing association sector in England using the Delphi method. *Housing Studies* 21 (2), 227-251.
- Opricovic, S. & Tzeng, G. (2002). Multicriteria planning of post-earthquake sustainable reconstruction. *The Journal of Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 17 (3), 211-220.
- Opricovic, S. & Tzeng, G. (2004). Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research* 156, 445-455.
- Opricovic, S. (1998). Multicriteria optimization of civil engineering systems. Faculty of Civil Engineering, Belgrade-Yugoslavia.
- Opricovic, S. (2009). A compromise solution in water resources planning. *Water Resource Management* 23, 1549-1561.
- Ozdemir, M.S. & Saaty, T.L. (2006). The unknown in decision making, what to do about it. *European Journal of Operational Research* 174 (1), 349-359.
- Özkan, B., Başlıgil, H. & Sahin, N. (2011). Supplier Selection Using Analytic Hierarchy Process: An Application From Turkey. *Proceedings of the World Congress on Engineering* 2.
- Pekka, K. & Raimo, V. (2006). Finding the most preferred alliance structure between bank and insurance companies. *European Journal of Operational Research* 175 (2), 1285-1299.
- Peris, J., Gómez, T. Ferrer, P., Monteverde, R. et al. (2002). *Teoría y proceso del proyecto*. Ediciones Universidad Politécnica de Valencia, Valencia-España.
- Pohekar, S. & Ramachandran, M. (2004). Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning – A review. *Renewable and Sustainable Energy Review* 8, 365-381.

- Polatidis, H. & Haralambopoulos, D. (2001). Renewable energy technologies penetration: The need for a multiple-criteria framework.
- Ramanathan, R. (2001). A note on the use of the analytic hierarchy process for environmental impact assessment. *Journal of Environmental Management* 63 (1), 27-35.
- Regnier, F. (1975). Utilisation de l'Abaque coloré comme outil d'une logique de la communication et de la découverte, Université Louis Pasteur, Séminaire sur le Fondement des Sciences, *Fundamenta Scientiae*, Strasbourg.
- Régnier, F. (1989). Annoncer la color, Institut de métrologie qualitative, Nancy.
- Ríos, M. & Ríos, S. (1989). *Proceso de Decisión Multicriterio*, EUDEMA Universidad, Madrid-España.
- Ríos, S., Bielza, C. & Mateos A. (2002). *Fundamentos de los sistemas de ayuda a la decisión*. De la edición RA-MA, Madrid-España.
- Rogers, C.D.F., Hao, T., Costello, S.B., Burrow, M.P.N., Metje, N., Chapman, D.N., et al. (2012). Condition assessment of the surface and buried infrastructure – A proposal for integration. *Tunnelling and Underground Space Technology* 28 (1), 202-211.
- Romero, C. (1996). *Análisis de las decisiones Multicriterio*. ISDEFE-Ingeniería de Sistemas, Madrid-España.
- Saaty, T. (1986). Axiomatic Foundation of the Analytic Hierarchy Process. *Management Science* 32(7), 841-855.
- Saaty, T. (1998). That is no the analytic hierarchy process: what the AHP is and what it is not. *Journal of Multicriteria Decision Analysis*, Vol. 6 (6), pp. 324-335.

- Saaty, T. L. (2005). *Theory and Applications of the Analytic Network Process*. ISBN-1888603062. RWS Publications, 4922 Ellsworth Avenue, Pittsburgh, PA 15213.
- Saaty, T. L. (2012). *Decision making for leaders. The analytic hierarchy process for decisions in a complex world*. Third edition, fifth printing. ISBN 0-9620317-X. RWS Publications, Pittsburgh, USA.
- Saaty, T.L. (1980). *The analytic hierarchy process*, McGraw-Hill, New York.
- Saaty, T.L. (1990). How to make a decision: the analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research* 48 (1), 9-26.
- Saaty, T.L., (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences* 1 (1), 83-98.
- Seger, K.A. (2003). *Utility security: the new paradigm*, PennWell Corporation, Tulsa.
- Singh, A. N., Gupta, M. P. & Ojha, A. (2014). Identifying critical infrastructure sectors and their dependencies: An Indian scenario. *International journal of critical infrastructure protection* 7, 1-85.
- Tak, S., Buchholz, B., Punnett, L. et al. (2011). Physical ergonomic hazards in highway tunnel construction: Overview from the Construction Occupational Health Program. *Applied Ergonomics* 42, 665-671.
- Tang, A.-P., Li, Z.-Q., Feng, R.-C. & Zhou, X.-Y. (2009). Model experiment and analysis on seismic response of utility tunnel systems using a shaking table. *Journal of Harbin Institute of Technology* 41 (6), 1-5.
- Thapa, R.B. & Murayama, Y. (2010). Drivers of urban growth in the Kathmandu valley, Nepal: examining the efficacy of the analytic hierarchy process. *Applied Geography* 30 (1), 70-83.

- Tong, L., Chen, C. & Wang, C. (2007). Optimization of multi-response processes using the VIKOR method. *International Journal Adv. Manuf. Technol* 31, 1049-1057.
- Tranchita, C., Hadjsaid, N. & Torres, A. (2009). Security assessment of the electricity infrastructure under terrorism. *Int. J. Crit. Frastruct* 5, 245-264.
- Triantaphyllou, E. & Sánchez, A. (1997). A sensitivity analysis approach for some deterministic multi-criteria decision making methods. *Decision Sciences* 28 (1), 151-194.
- Tzeng, G., Shiau, T. & Lin, C. (1992). Application of multicriteria decision making to the evaluation of new energy system development in Taiwan. *Energy* 17 (10), 983-92.
- Tzeng, G., Tsaur, S., Laiw, Y. & Opricovic S. (2002). Multicriteria analysis of environmental quality in Taipei: Public preferences and improvement strategies. *Journal of Environmental Management* 65 (2), 109-120.
- US Congress. (2002). Public Health Security and Bioterrorism Preparedness and Response Act of 2002: Public law 107-188. 107th Congress, June 12, 2002.
- US Department of Homeland Security (USDHS). (2003). Homeland security presidential directive 7: Critical infrastructure identification, prioritization, and protection.
- US Environmental Protection Agency (USEPA). (2013). Homeland security and EPA's strategic plan.
- Van der Vleuten, E. & Legendijk, V. (2010). Interpreting transnational infrastructure vulnerability: European black out and the historical dynamics of transnational electricity governance. *EnergyPolicy* 38, 2053-2062.
- Vargas, L. (1990). An overview of the Analytic Hierarchy Process and its applications. *European Journal of Operational Research* 48, 2-8.

- Winston, L.W. (1991). Operations research. Second edition, Boston, MA: PWS-Kent Publishing Co.
- Yedla, S. & Shreshtha, R. (2003). Multicriteria approach for selection of alternative option for environmentally sustainable transport system in Delhi. Transportation Research part A 37, 717-29.
- Yu, P. (1973). A Class of Solutions for Group Decision Problems. Management Science 19, 688-693.
- Zeleny, M. (1982). Multiple Criteria Decision Making. Mc-Graw-Hill, New York.



**ANEXOS**

---

## ANEXO.- PUBLICACIÓN

Durante la realización de esta tesis doctoral, se redactaron dos artículos en revistas internacionales indexadas en el JCR. El primero fue publicado en marzo de 2009 con número DOI 10.1016/j.tust.2008.07.004 en la revista de distribución internacional, TUNNELLING AND UNDERGROUND SPACE TECHNOLOGY, con ISSN 0886-7798. El segundo fue publicado en septiembre de 2013 con número DOI 10.1016/j.eswa.2013.02.031 en la revista de distribución internacional, EXPERT SYSTEMS WITH APPLICATIONS, con ISSN 0957-4174. Las características de estas revistas son:

<b>Full Journal Title:</b>	<b>TUNNELLING AND UNDERGROUND SPACE TECHNOLOGY</b>	<b>Categoría de JCR</b>	Q2
<b>ISO Abbrev. Title:</b>	Tunn. Undergr. Space Technol.		
<b>JCR Abbrev. Title:</b>	TUNN UNDERGR SP TECH		
<b>ISSN:</b>	0886-7798	<b>Issues / Year</b>	6
<b>Language:</b>	ENGLISH	<b>Journal Country / Territory:</b>	ENGLAND
<b>Publisher:</b>	PERGAMON-ELSEVIER SCIENCE LTD		
<b>Journal Rank in Categories:</b>	For 2009, the journal <b>TUNNELLING AND UNDERGROUND SPACE TECHNOLOGY</b> has an Impact Factor of 0,860		

El título de la publicación es “Analysing utility tunnels and highway networks coordination dilemma”. Se adjunta una copia de la primera y última página del artículo.



Contents lists available at ScienceDirect

## Tunnelling and Underground Space Technology

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/tust](http://www.elsevier.com/locate/tust)

## Analysing utility tunnels and highway networks coordination dilemma

Julian Canto-Perello<sup>a,\*</sup>, Jorge Curiel-Esparza<sup>b</sup>, Vicente Calvo<sup>c</sup><sup>a</sup> Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, Spain<sup>b</sup> Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, Spain<sup>c</sup> Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicaciones, Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, Spain

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received 9 June 2008

Received in revised form 28 July 2008

Accepted 29 July 2008

Available online 23 September 2008

## Keywords:

Utility tunnel

Utilidors

Transportation networks

Underground sustainability

Urban planning

## ABSTRACT

Utilities are an integral component of the total transportation network comprising highways, railways, airways, and waterways, as well as pipelines, wires, and cables that transport people, goods, and public services. The perennial dilemma of mutual interference between utility lines and transportation networks could be minimised making use of utility tunnel systems. Utilidors most striking feature is that they house several types of power, water, sewage, communications, gas and other statutory services in an easily accessible space. Placing utilities in tunnels under public rights-of-way reduces the continual cutting of pavements resulting from utility burial practices and facilitates the installation, inspection, replacement, and maintenance operations. Utility tunnels and transportation networks may not be compatible at transmission levels. Highway systems are generally planned to avoid high-density areas insofar as is possible. However, where the location of utility networks coincides sufficiently with the highway routes, the situation becomes more favourable to the utility tunnel concept. This paper discusses how compatibility of utility system networks with highway system networks could be greatly improved by appropriate attention to utilidor systems in urban planning. A sustainable approach to the dilemma of where to locate utilities in urban streets and highways has become urgent as the need for services expands in our modern cities. Interference between the safety and flow of highway traffic and utility tunnel operation could be a problem unless adequate measures are undertaken.

© 2008 Elsevier Ltd. All rights reserved.

## 1. Introduction

Efficient and reliable highway and utility systems are key factors to live in a modern society (Carmody and Sterling, 1993; Duffaut, 1996; Duffaut and Labbe, 2002). The construction of any underground infrastructure involves a consumption of subsurface space. Moreover, these facilities will take up the subsurface even when they become outdated. The growing scarcity of available real estate and its rising cost are forcing the consideration and use of technical designs involving joint utilization of right-of-way to reduce utility space consumption (Cano-Hurtado and Canto-Perello, 1999). The shallow urban underground is a non-renewable resource. Therefore, these facilities must include environmental sustainability parameters in their design. Sustainability is defined as "meeting the needs of the present generation without compromising the ability of future generations to meet their needs", according to the Brundtland Report of the UN's World Commission on Environment and Development (Brundtland, 1987). For municipal engineers involved in design and construction of utilities, sustainable strategies must be a tool to use resources adequately; minimising

damage to the environment and ensuring future subsurface uses will not be affected (ITA, 2004). Therefore, there is an increasing interest in utility tunnels as a problem-solving technique to avoid congestion of the rights-of-way. A multi-utility tunnel is defined as an underground facility containing one or more utility systems, permitting the installation, maintenance and removal of the utilities without making street cuts or excavations (see Fig. 1). However, managing these underground facilities is always challenging due to synergistic issues.

Establishing future sustainable strategies in urban underground engineering consists of the ability to lessen the use of traditional trenching (Curiel-Esparza et al., 2004). Obviously, this task goes beyond the role of a short-term urban planning. Use of utility tunnels provides necessary space for statutory services, involving underground pipes and cables, with minimum environmental impact (Canto-Perello and Curiel-Esparza, 2001). Moreover, utilidors guarantee the underground space resources for future generations. In considering the viability of utilidors in coordination with highways, it is necessary to compare conventional utility and transportation systems layouts and characteristics. The purpose of this paper is to analyse the advantages and disadvantages of utilidor practice in highway networks. However, the potential compatibility problems may also include interference of utilities among themselves operating in a tunnel environment.

\* Corresponding author. Tel.: +34 963877000; fax: +34 963879569.  
E-mail addresses: [jcanto@est.upv.es](mailto:jcanto@est.upv.es) (J. Canto-Perello), [jcuriel@fis.upv.es](mailto:jcuriel@fis.upv.es) (J. Curiel-Esparza), [vicalpe@fis.upv.es](mailto:vicalpe@fis.upv.es) (V. Calvo).

system secondary distribution system and local street level, where essentially every street contains every utility. Therefore, the success of any highway project incorporating utility tunnels will depend upon the cooperation and agreement of all authorities concerned. The policies and practices of local authorities, public and private companies and the various regulatory bodies must be an encouraging factor for the development of utility tunnel systems through all phases of planning, financing, construction and operation. A change in methods of traditional burial never comes easily, although it will inevitably be necessary.

#### References

- Abu Sier, D., Lansey, K., 2005. Monitoring sewage networks for sanitary sewer overflows. *Civil Engineering and Environmental Systems* 22 (2), 123–132.
- Baylis, J.C., 1904. Pipe galleries for New York. *Municipal Journal and Engineer* 17 (2), 56–58.
- Brundtland, G.H., 1987. *Our Common Future*. Oxford University Press, Oxford.
- Cano-Hurtado, J., Canto-Perello, J., 1999. Sustainable development of urban underground space for utilities. *Tunnelling and Underground Space Technology* 14 (3), 335–340.
- Canto-Perello, J., Curiel-Esparza, J., 2001. Human factors engineering in utility tunnel design. *Tunnelling and Underground Space Technology* 16 (3), 211–215.
- Canto-Perello, J., Curiel-Esparza, J., 2003. Risks and potential hazards in utility tunnels for urban areas. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Municipal Engineer* 156 (1), 51–56.
- Canto-Perello, J., Curiel-Esparza, J., 2006. An analysis of utility tunnel viability in urban areas. *Civil Engineering and Environmental Systems* 23 (1), 11–19.
- Carmody, J., Sterling, R.L., 1993. *Underground Space Design*. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Curiel-Esparza, J., Canto-Perello, J., 2005. Indoor atmosphere hazard identification in person entry urban utility tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology* 20 (5), 426–434.
- Curiel-Esparza, J., Canto-Perello, J., Calvo, M.A., 2004. Establishing sustainable strategies in urban underground engineering. *Science and Engineering Ethics* 10 (3), 523–530.
- Duffaut, P., 1996. Paris conference examines the “Rightful” Place of the underground space in the modern city. *Tunnelling and Underground Space Technology* 11 (1), 126–130.
- Duffaut, P., Labbe, M., 2002. From underground road traffic to underground city planning. In: *Proceedings of the International Conference Urban Underground Space: A Resource for Cities*, Torino.
- Engineering News, 1900. Subways for street pipes and wires. *Engineering News and American Journal Railway Journal* 43 (11), 176–178.
- Engineering News, 1907. Pipe subways in British cities and Paris. *Engineering News and American Journal Railway Journal* 57 (11), 280–284.
- Federal Highway Administration, 2003. *Program Guide Utility Relocation and Accommodation on Federal-Aid Highway Projects*, sixth ed.
- Hadjihambi, M., Derziotis, A., 2002. Funding first for Athens’s new olympic airport. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Civil Engineering* 150 (4), 169–177.
- International Tunnelling Association, Working Group No. 4, 2000. Planning and mapping of underground space – an overview. *Tunnelling and Underground Space Technology* 15 (3), 271–286.
- International Tunnelling Association, Working Group No. 13, 2004. Underground or aboveground? Making the choice for urban mass transit systems: a report by the International Tunnelling Association (ITA). Prepared by Working Group Number 13 (WG13). ‘Direct and indirect advantages of underground structures’. *Tunnelling and Underground Space Technology* 19 (1), 3–28.
- Madryas, C., 2008. Forensic investigations of buried utilities failures in Poland. *Tunnelling and Underground Space Technology* 23 (2), 199–205.
- Malfas, M., Theodoraki, E., Houlihan, B., 2004. Impact of the Olympic Games as mega-events. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Municipal Engineer* 157 (3), 209–220.

<b>Full Journal Title:</b>	<b>EXPERT SYSTEMS WITH APPLICATIONS</b>	<b>Categoría de JCR</b>	Q1
<b>ISO Abbrev. Title:</b>	Expert Syst. Appl.		
<b>JCR Abbrev. Title:</b>	EXPERT SYST APPL		
<b>ISSN:</b>	0957-4174	<b>Issues / Year</b>	8
<b>Language:</b>	ENGLISH	<b>Journal Country / Territory:</b>	USA
<b>Publisher:</b>	PERGAMON-ELSEVIER SCIENCE LTD		
<b>Journal Rank in Categories:</b>	For 2013, the journal <b>EXPERT SYSTEMS WITH APPLICATIONS</b> has an Impact Factor of 1,965		

El título de la publicación es “Criticality and threat analysis on utility tunnels for planning security policies of utilities in urban underground space”. Se adjunta una copia de la primera y última página del artículo.



Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

Expert Systems with Applications

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/eswa](http://www.elsevier.com/locate/eswa)

## Criticality and threat analysis on utility tunnels for planning security policies of utilities in urban underground space

Julian Canto-Perello<sup>a,\*</sup>, Jorge Curiel-Esparza<sup>b</sup>, Vicente Calvo<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Department of Construction Engineering and Civil Engineering Projects, Universitat Politècnica de Valencia, Valencia, Spain

<sup>b</sup> Physical Technologies Center, Universitat Politècnica de Valencia, Valencia, Spain

<sup>c</sup> Faculty of Industrial Engineering, Universitat Politècnica de Valencia, Valencia, Spain

### ARTICLE INFO

#### Keywords:

Utilities security strategies  
Utility tunnels networks  
Urban underground space  
Color-coded scaled Delphi method  
Analytic Hierarchy Process

### ABSTRACT

A utility tunnel is defined as an underground structure containing one or more utilities, permitting the installation, maintenance and removal of the systems without the necessity of making street cuts or excavations. These underground facilities contain all essential utilities serving large urban areas collected together in a tunnel; therefore they are an inviting target for sabotage or vandalism. This paper proposes an expert system combining color-coded scales, Delphi and AHP methods to analyze criticality and threats on utility tunnels to support planning of security policies for utilities in urban subsurface.

© 2013 Elsevier Ltd. All rights reserved.

### 1. Introduction

Since the Second Industrial Revolution, rapid urban growth has created problems in finding underground space for the necessary pipes and cables of the assorted utilities. There is a virtual maze of utilities underground that have been added gradually and usually unsystematically over a long period of time. This maze of utilities has been ironically termed "the spaghetti subsurface problem" (Oude 1992) by municipal engineers. Because of the expanding population with its demands for more diversified services, we cannot afford this piecemeal type of utilities growth (Cano-Hurtado & Canto-Perello, 1999; Duffaut & Labbe, 2002; He, Song, Dai, & Durbak, 2012; Jung, 2012; Sterling, 1997; Sterling & Carmody, 1993; Zhang et al., 2009). Moreover, it is part of European Union policy to achieve a high level of health and environmental protection, and one of the objectives to be pursued is sustainable development (Steurer & Bergerb, 2011). One solution appears to rest in the use of utility tunnels as a more sustainable technique (Canto-Perello & Curiel-Esparza, 2006; Choon et al., 2011). Utility tunnels can house the full range of electric power, water, communications, heating lines, gas and other public services. They may well constitute the answer to the perennial problem plaguing many municipalities: how to accommodate needed utilities without the mutual interference caused by the operation and maintenance of these utilities and urban streets (Canto-Perello & Curiel-Esparza, 2001; Rogers et al., 2012). Compartmentalization of subsurface public service systems largely follows historical development without considerations of

the benefits of integration. Usually, companies were established to address specific utilities (electricity, telephone, gas, etc.) without considering sustainable integration. Placing utility networks in tunnels can avoid the continual cutting of pavements resulting from present trenching technique and should facilitate the installation, inspection, replacement, and maintenance of these facilities. In addition, utility tunnels enable an easy and inexpensive preventive and predictive maintenance to avoid utilities failures or leakages promoting a more efficient use of resources.

No serious technical problems with respect to utilities have been reported with the exception that sewers generally cannot be installed in tunnels unless grade and elevation conditions are coincident or pressure systems are utilized. In addition, considerable apprehension remains about the inclusion of gas systems in utility tunnels. However, previous studies relating to utility tunnels have evidenced concern by utility companies and others as to compatibility among utilities in a tunnel environment; the hazards of gas leaks and explosions; water pipe leaks and rupture; hazards to workmen from unfamiliar systems; as well as security issues (Abdul Salam, 2007; Canto-Perello & Curiel-Esparza, 2003; Curiel-Esparza & Canto-Perello, 2005; Fouladgar, Yazdani-Chamzini, & Zavadskas, 2012; Ghorbani, Sharifzadeh, Yasrobi, & Daiyan, 2012; Zhou, Tang, & Zhang 2009). The technical feasibility of the utility tunnel concept depends on the adequacy of the technology for the solution of problems expected to be encountered in the construction of utility tunnels, the installation of utility systems therein, and the operation and maintenance of the installed utilities (Ben-Haim, 2012; Canto-Perello, Curiel-Esparza, & Calvo, 2009; Curiel-Esparza, Canto-Perello, & Calvo, 2004). Nowadays, considerable attention has been given to utilities both from the point of view of the impact on the environment and the utilities security.

\* Corresponding author. Address: Universitat Politècnica de Valencia, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain. Tel.: +34 96 387 7560; fax: +34 96 387 7569.  
E-mail address: [jcantope@pcsupv.es](mailto:jcantope@pcsupv.es) (J. Canto-Perello).

0957-4174/\$ - see front matter © 2013 Elsevier Ltd. All rights reserved.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2013.02.031>

interference to urban environment. These facilities are undoubtedly an inviting target for sabotage or vandalism, as they contain all essential utilities serving large urban areas. Therefore, when utility tunnels are projected and managed, it is very important to plan their utilities security policies adequately. To achieve this goal consistently, the criticality and possible threats must be analyzed in detail. The proposed expert system, based on Delphi color-coded scaled and AHP, provides support in decision-making for the systematic planning of security policies for utilities. Finally, some limitations of our procedure should be noted and discussed. First, the applied procedure is intended for the entire network of utility tunnels. And second, if there is any particular section near to a critical infrastructure or building, a special study should be performed and ad hoc measures undertaken.

## References

- Abdul Salam, A. O. (2007). Safety in automated transportation tunnels. In *15th Mediterranean conference on control and automation*. Athens: Greece.
- ANSI Z535.1-2006 - R2011. (2011). Safety Colors. American National Standards Institute, Inc.
- APWA (American Public Works Association). (1999). Color Code and Marking Guidelines. 4/1999.
- Ben-Haim, Y. (2012). Doing our best: Optimization and the management of risk. *Risk Analysis*, 32(8), 1326–1332.
- Cano-Hurtado, J. J., & Canto-Perello, J. (1999). Sustainable development of urban utility tunnels for utilities. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 14(3), 335–340.
- Canto-Perello, J., & Curiel-Esparza, J. (2001). Human factors engineering in utility tunnel design. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 16(3), 211–215.
- Canto-Perello, J., & Curiel-Esparza, J. (2003). Risks and potential hazards in utility tunnels for urban areas. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Municipal Engineer*, 156(1), 51–56.
- Canto-Perello, J., & Curiel-Esparza, J. (2006). An analysis of utility tunnel viability in urban areas. *Civil Engineering and Environmental Systems*, 23(1), 11–19.
- Canto-Perello, J., & Curiel-Esparza, J. (2013). Assessing governance issues of urban utility tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 33(1), 82–87.
- Canto-Perello, J., Curiel-Esparza, J., & Calvo, V. (2009). Analysing utility tunnels and highway networks coordination dilemma. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(2), 185–189.
- Caponocchia, C. (2012). Relative risk perception for terrorism: Implications for preparedness and risk communication. *Risk Analysis*, 32(9), 1524–1534.
- Choon, S. W., Siwara, C., Pereira, J. J., Jemain, A. A., Hashima, H. S., & Hadib, A. S. (2011). A sustainable city index for Malaysia. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 18(1), 28–35.
- Chow, T. E., & Sadler, R. (2010). The consensus of local stakeholders and outside experts in suitability modelling for future camp development. *Landscape and Urban Planning*, 94(1), 9–19.
- Curiel-Esparza, J., & Canto-Perello, J. (2005). Indoor atmosphere hazard identification in person entry urban utility tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20(5), 426–434.
- Curiel-Esparza, J., & Canto-Perello, J. (2012). Understanding the major drivers for implementation of municipal sustainable policies in underground space. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 19(6), 506–514.
- Curiel-Esparza, J., Canto-Perello, J., & Calvo, M. A. (2004). Establishing sustainable strategies in urban underground engineering. *Science and Engineering Ethics*, 10(3), 523–530.
- Duffaut, P., & Labbe, M. (2002). From underground road traffic to underground city planning. In *Proceedings of the international conference urban underground space: A resource for cities* (pp. 2–9). Italy: Torino.
- Feng, B., Ma, J., & Fan, Z. P. (2011). An integrated method for collaborative R&D project selection: Supporting innovative research teams. *Expert Systems with Applications*, 38(5), 5532–5543.
- Fouldagar, M. M., Yazdani-Chamzini, A., & Zavadskas, E. K. (2012). Risk evaluation of tunnelling projects. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 12(1), 1–12.
- Ghorbani, M., Sharifzadeh, M., Yasrobi, S., & Dayan, M. (2012). Geotechnical, structural and geodetic measurements for conventional tunnelling hazards in urban areas – The case of Niayesh road tunnel project. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 31(1), 1–8.
- Gilbert, P. H., Isenberg, J., Baecher, G. B., Papay, L. T., Spielvogel, L. G., Woodard, J. B., et al. (2003). Infrastructure issues for cities – countering terrorist threat. *Journal of Infrastructure Systems*, 9(1), 44–54.
- Godard, J. P. (2004). Urban underground space and benefits of going underground. In *Proceedings of the world tunnel congress of the international tunnelling association*, Singapore.
- Godet, M., & Durance, P. (2011). *La Prospective Stratégique, Pour les Entreprises et les Territoires*. Paris: UNESCO-Dunod.
- Godet, M., Durance, P., & Gerber, A. (2006). Strategic foresight, la prospective problems and methods. Paris, Laboratoire d'Investigation en Prospective, Stratégie et Organisation.
- Gracht, H. A. (2012). Consensus measurement in Delphi studies, review and implications for future quality assurance. *Technological Forecasting and Social Change*, 79(8), 1525–1536.
- He, L., Song, Y., Dai, S., & Durbak, K. (2012). Quantitative research on the capacity of urban underground space – The case of Shanghai, China. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 32(1), 168–179.
- HSPD3 (2002). *Homeland Security Advisory System*. Washington.
- Hsu, C. C., & Sandord, B. A. (2007). The Delphi technique: Making sense of consensus. *Practical Assessment, Research and Evaluation*, 12(10), 1–7.
- Joshi, R., Banwet, D. K., & Shankar, R. (2011). A Delphi-AHP-TOPSIS based benchmarking framework for performance improvement of a cold chain. *Expert Systems with Applications*, 38(8), 10170–10182.
- Jung, Y. J. (2012). Evaluation of subsurface utility engineering for highway projects: Benefit-cost analysis. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 27(1), 111–122.
- Lee, G. K. L., & Chan, E. H. W. (2008). The analytic hierarchy process (AHP) approach for assessment of urban renewal proposals. *Social Indicators Research*, 89(1), 155–168.
- Lemley, J. R., Fthenakis, V. M., & Moskowitz, P. D. (2003). Security risk analysis for chemical process facilities. *Process Safety Progress*, 22(3), 153–162.
- Li, H., Apostolakis, G. E., Gifun, J., VanSchalkwijk, W., Leite, S., & Barber, D. (2009). Ranking the risks from multiple hazards in a small community. *Risk Analysis*, 29(3), 438–456.
- Ma, Z., Shao, C., Ma, S., & Ye, Z. (2011). Constructing road safety performance indicators using Fuzzy Delphi Method and Grey Delphi Method. *Expert Systems with Applications*, 38(3), 1509–1514.
- Marchais-Roubelat, A., & Roubelat, F. (2011). The Delphi method as a ritual: Inquiring the Delphi Oracle. *Technological Forecasting & Social Change*, 78(9), 1491–1499.
- Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *The Psychological Review*, 63(1), 81–97.
- Mullins, D. (2006). Exploring change in the housing association sector in England using the Delphi method. *Housing Studies*, 21(2), 227–251.
- Oude, E. H. I. (1992). *Underground space and sheltered structures*. Delft: Holland.
- Ozdemir, M. S., & Saaty, T. L. (2006). The unknown in decision making, what to do about it. *European Journal of Operational Research*, 174(1), 349–359.
- Ramanathan, R. (2001). A note on the use of the analytic hierarchy process for environmental impact assessment. *Journal of Environmental Management*, 63(1), 27–35.
- Regnier, F. (1975). *Utilisation de l'Abaque coloré comme outil d'une logique de la communication et de la découverte*. Strasbourg: Université Louis Pasteur, Séminaire sur le Fondement des Sciences, Fundamenta Scientiae.
- Régner, F. (1989). *Annexer la Color*. Nancy: Institut de métrologie qualitative.
- Rogers, C. D. F., Hao, T., Costello, S. B., Burrow, M. P. N., Metje, N., Chapman, D. N., et al. (2012). Condition assessment of the surface and buried infrastructure – A proposal for integration. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 28(1), 202–211.
- Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. New York: McGraw-Hill.
- Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 48(1), 9–26.
- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83–98.
- Seger, K. A. (2003). *Utility security: The new paradigm*. Tulsa: PennWell Corporation.
- Sterling, R. (1997). Underground technologies for livable cities. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 12(4), 479–490.
- Sterling, R., & Camody, J. (1993). *Underground Space Design*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Steurera, R., & Bergerb, G. (2011). The EU's double-track pursuit of sustainable development in the 2000s: How Lisbon and sustainable development strategies ran past each other. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 18(2), 99–108.
- Syamsuddin, I., & Hwang, J. (2010). The use of AHP in security policy decision making: An open office call application. *Journal of Software*, 5(10), 1162–1169.
- Tang, A.-P., Li, Z.-Q., Feng, R.-C., & Zhou, X.-Y. (2009). Model experiment and analysis on seismic response of utility tunnel systems using a shaking table. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 41(6), 1–5.
- Thapa, R. B., & Murayama, Y. (2010). Drivers of urban growth in the Kathmandu valley, Nepal: Examining the efficacy of the analytic hierarchy process. *Applied Geography*, 30(1), 70–83.
- Viddal, L. A., Marle, F., & Boquet, J. C. (2011). Using a Delphi process and the Analytic Hierarchy Process (AHP) to evaluate the complexity of projects. *Experts Systems with Applications*, 38(5), 5388–5405.
- Zavadskas, E. K., Turskis, Z., & Tamosaitiene, J. (2011). Selection of construction enterprises management strategy based on SWOT and multi-criteria analysis. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 11(4), 1063–1082.
- Zhang, J. C., Ding, X. M., Pang, Y. S., Li, W. P., Tong, H. W., Zheng, X. C., et al. (2009). Analysis for development and utilization of underground space in Guangzhou. *Gongcheng Lixue – Engineering Mechanics*, 26(2), 106–114.
- Zhou, J., Tang, Q., & Zhang, J. (2009). Dynamic risk assessment for excavation engineering based on human factors. In *1st International conference on information science and engineering*, China: Nanjing.