Apéndice D

LA EVALUACIÓN DEL RIESGO Y LA INCERTIDUMBRE EN EL ÁMBITO DE LA CONSTRUCCIÓN

ÍNDICE

D.1. INTRODUCCIÓN

Al hilo del contenido del apartado 2.4. del estado del conocimiento de esta tesis, el presente apéndice recoge un análisis detallado de los desarrollos cuantitativos correspondientes al enfoque probabilista y al uso de la matemática difusa para la evaluación del riesgo. Como puede deducirse de la explicación del citado capítulo de la tesis, se tratan aquí los desarrollos correspondientes al enfoque positivista de la cuestión y a la aportación más significativa de las aportaciones de transición entre el citado paradigma y la perspectivca posmodernista. Respecto a esta última, el presente apéndice no la contempla, pues se considera suficientemente explicada en el contenido del estado del conocimiento de la tesis. En este sentido, al ser un tratamiento cualitativo del problema, no precisa una descripción tan pormenorizada y, por otro lado, su carácter reciente hace que su desarrollo haya sido menos extenso que el correspondiente al paradigma probabilista.

D.2. LA EVALUACIÓN DESDE EL ENFOQUE PROBABILISTA

D.2.1. El desarrollo teórico del tratamiento de los riesgos especulativos

Aunque existen pocas referencias explícitas relativas al concepto de riesgo especulativo desde el punto de vista de su articulación matemática, cabe identificar un desarrollo notablemente superior al caso de los riesgos puros. En este desarrollo cabe diferenciar dos niveles de incertidumbre, según se visualiza en la figura 2.4 recogida en el capítulo 2 de esta tesis:

a) incertidumbre asociada a la agregación de los resultados posibles de una cierta variable considerada
b) incertidumbre relativa a la agregación de estimaciones u opiniones en el contexto del trabajo en equipo o de una toma de decisión participativa

D.2.1.1. La incertidumbre asociada a la agregación de resultados

Este caso corresponde a la situación de la existencia de una sola fuente de información, que aporta diversos posibles resultados, cada uno de ellos con una cierta probabilidad de ocurrencia. En este sentido, cabe remitirse a la distinción existente en la literatura entre dos vertientes del concepto de riesgo frente a la toma de decisiones en condiciones deterministas o de "certeza":

i) la toma de decisión en condiciones de "riesgo", que se entiende como una indeterminación expresada en probabilidades asociadas a cada posible resultado, y

ii) la "incertidumbre", cuya esencia la describe como un desconocimiento de las probabilidades asociadas a los resultados.

De hecho, esta distinción es la que suele emplearse en el contexto del análisis de decisiones sobre financiación e inversión (véase, por ejemplo, De Pablo et al, 1987) y en la gestión de proyectos (Kenzner, 2001). Sin embargo, a pesar de su difusión, al analizarla cabe percatarse de que ignora el concepto de riesgo puro, y supone una elección discutible de los términos a aplicar para la diferenciación entre el conocimiento o no de las probabilidades asociadas. No obstante, es de gran interés, ya que distingue la casuística correspondiente a la disponibilidad o no probabilidades (derivadas de datos históricos o estimadas). La diferencia entre ambos casos radica en que en el segundo el decisor no tiene información suficiente para asignar probabilidades a los resultados futuros, de modo que conoce únicamente los estados de la naturaleza que pueden presentarse y sus consecuencias (De Pablo et al, 1987). En el primer caso, sin embargo, se supone la disponibilidad de datos o la posibilidad de estimar las probabilidades asociadas a los diversos resultados. En definitiva el análisis de la incertidumbre relativa a la agregación de resultados se articulará entorno a estos dos casos:

i) Sin probabilidades asociadas (decisión en condiciones de incerteza)
ii) Con probabilidades asociadas (decisión en condiciones de riesgo)

Como ejemplo, baste considerar para el primer caso el estudio de una inversión donde se prevean tres posibles resultados; uno más pesimista, otro más optimista y un tercero más probable. A cada uno de estos posibles resultados se le asociaría una probabilidad. El segundo caso, sin embargo, correspondería a una decisión acerca de la viabilidad de un cierto proyecto, para el que se suponen tres posibles grados de demanda; baja, normal y alta. En este último caso no se considerarían probabilidades asociadas sino resultados esperados en cada una de las tres posibilidades (De Pablo et al, 1987). En cualquier caso, en todas las situaciones se dispone de un elenco de posibles resultados en base a los cuales, según el enfoque positivista, deberá articularse un criterio cuantitativo que permita discernir qué solución es la óptima desde un punto de vista racional. A continuación se estudiarán las propuestas a este respecto con base en la distinción entre los dos casos comentados anteriormente.

i) Agregación de resultados sin probabilidades asociadas

En condiciones de desconocimiento de las probabilidades asociadas a los resultados, históricamente se ha propuesto el tratamiento del riesgo mediante cuatro criterios clásicos de toma de decisión, recogidos en la tabla D.1.

CRITERIO	FORMULACIÓN	NOTACIÓN
CRITERIO DE LAPLACE	$Max_i b_i \quad tq \quad b_i = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} b_{ij}$	b_{ij}: resultado que se obtiene cuando se toma la decisión d_i y se presenta el estado de la naturaleza e_j
CRITERIO MAXIMIN	$Max_i Min_j b_{ij}$	id
CRITERIO MAXIMAX	$Max_i Max_j b_{ij}$	id
CRITERIO DE HURWICZ	$Max(\alpha \cdot M_i + (1-\alpha) \cdot m_i)$ $donde \quad m_i = min_j b_{ij} \quad M_i = max_j b_{ij} \quad 0 < \alpha < 1$	- b_{ij} id caso anterior - α: coeficiente a determinar por el decisor
CRITERIO DE SAVAGE O MINIMAX DE PÉRDIDAS	$b_{ij} = b_{ij} - max_i b_{ij}$ $d^* \quad tq \quad min_i max_j b_{ij}$	b_{ij} id caso anterior d*: cierta decisión que cumple la condición especificada

Tabla D.1. Criterios de integración de resultados en caso de desconocimiento de las probabilidades asociadas

Dichos criterios suponen un modo de integrar la diversidad de resultados obtenidos por la estimación en un único índice que permita una reducción de dimensionalidad, una transformación de un parámetro vectorial a un escalar, dirigido a un posterior tratamiento de la información. Podría expresarse esta idea mediante la siguiente expresión,

$$x_1, ...x_n \Rightarrow \tilde{x} \qquad \text{(D.1.)}$$

Esta manera positivista de tratar los posibles resultados de una realidad en estudio constituye una primera aproximación al tratamiento de los riesgos, ya que la información que aportan es muy limitada. En cualquier caso, constituyen un punto de partida y un modo sencillo de integrar el posible rango de valores obtenidos en una estimación.

ii) Incertidumbre asociada a la agregación de resultados conocidas sus probabilidades asociadas; el enfoque probabilista.

Siguiendo la anterior distinción de Kenzner (2001), el tratamiento clásico del riesgo se articula mediante la introducción de una probabilidad asociada al rango de posibles valores de cada variable, de forma discreta (asignando una probabilidad a cada uno de los posibles resultados) o mediante una función continua de probabilidad obtenida mediante la regresión de datos históricos o estimaciones.

Los modos más usuales de introducir el componente de riesgo en la estimación cuantitativa de un parámetro se basan nuevamente en la integración de los diversos resultados posibles en un índice homogéneo, según la idea que se intenta visualizar en la expresión D.1. Los criterios más frecuentemente utilizados al respecto son los recogidos en la tabla D.2.

CRITERIO	FORMULACIÓN	NOTACIÓN
VALOR ESPERADO o ESPERANZA (VE)	- Caso discreto: $VE = \sum_{i=1}^{n} p_i \cdot x_i$ - Caso continuo: $VE = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \cdot x \cdot dx$	- x (xi): resultados de la variable x - pi: probabilidad asociada al resultado i. - f(x): función de probabilidad de x
DOMINANCIA ESTOCÁSTICA	A domina estocásticamente a B sii; $F_A(x)>F_B(x)$ $\forall$ x	$F_A(x)$, $F_B(x)$; funciones de probabilidad acumulada de las alternativas A y B.
EQUIVALENTE DE CERTIDUMBRE (EC)	EC=α·VE, donde $\alpha \in [0,1]$	-α: coeficiente reductor
PRIMA DE RIESGO (p)	i'=i+p	-i: parámetro inicial - i': parámetro modificado
ESPERANZA – DESVIACIÓN TÍPICA (ED) (o Parámetro de aversión al riesgo)	ED=VE- δ σ	- σ: desviación típica - δ: coeficiente indicativo de la aversión al riesgo
VARIANZA (σ)	$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n}}$	- x_i: resultado i - x: media aritmética de los resultados
ESPERANZA CONDICIONADA (EC)	EC=VE tq $p_{pérdidas}<\alpha$	α: probabilidad máxima admitida de existencia de pérdidas

Tabla D.2. Modos de integrar los posibles resultados conocidas las probabilidades asociadas

De entre los criterios recogidos en la tabla anterior, el valor esperado es el más utilizado en el tratamiento matemático de los riesgos. Prueba de ello es que las referencias a los cinco últimos criterios en la literatura de gestión de riesgos son más bien escasas. De hecho, algunos de los otros criterios recogidos son variantes más sofisticadas del primero. El cálculo del valor esperado en el caso discreto se articula con frecuencia mediante un árbol de decisión (véase el apéndice B de esta tesis), cuyas ramas llevan asociados los diferentes resultados posibles con sus respectivas probabilidades.

Por su parte, el criterio de la prima del riesgo se utiliza sobre todo para modelizar la "prima" en el tipo de interés, por lo que su aplicabilidad se reduce más bien a aspectos de tipo económico, como el cálculo de los costes del ciclo de vida.

Por otro lado, tanto el término α del equivalente de certidumbre (EC) como el término análogo de aversión al riesgo en el criterio ED introducen una regulación del decisor, es decir, intentan modelizar la vertiente subjetiva de la posición frente al riesgo.

Asimismo, la probabilidad tolerada del criterio de esperanza condicionada hace referencia de otra manera similar al mismo concepto.

Finalmente, la consideración de la varianza como criterio de toma de decisión implica un énfasis en la fiabilidad del resultado, de manera que se optaría por el resultado con menos dispersión. En cualquier caso, parece un tanto presuntuoso adoptar un criterio que ignore el rango de valores alcanzados y se centre únicamente en la densidad de los mismos.

D.2.1.2. Agregación de estimaciones u opiniones en el contexto de trabajo en equipo

Según el esquema de estudio propuesto, el siguiente punto de análisis se centrará en un nivel anterior de agregación, el correspondiente a la existencia de varias fuentes de información, como por ejemplo diversas estimaciones u opiniones de sujetos diversos en un contexto de toma de decisión en equipo. Por su íntima relación con el comportamiento humano, esta cuestión ha suscitado una considerable discusión teórica (Ferrell, 1985).

Para acometer el estudio, es necesario distinguir entre dos casos según se plantee la estimación sobre el resultado o sobre la probabilidad asociada a los diversos valores incluidos en un cierto rango de posibles resultados, en función de si estos son o no conocidos a priori (figura D.1.).

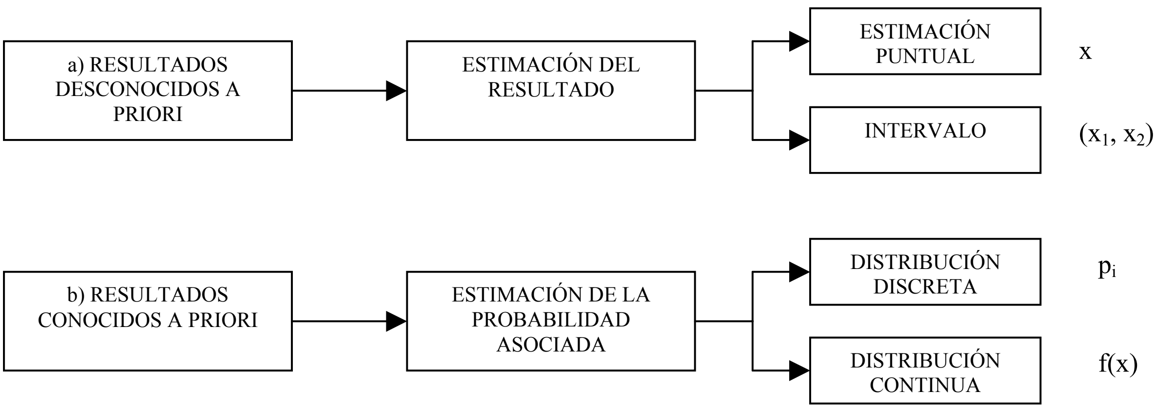

Figura D.1. Casuística asociada a la estimación en el contexto del trabajo en equipo

Por tanto, vuelve a aparecer una doble casuística de estudio:

i) Resultados desconocidos a priori (estimación de los resultados)
ii) Resultados conocidos a priori (estimación de la probabilidad asociada a los resultados)

Tal como se observa en la figura anterior, la estimación puede realizarse con base en un rango o conjunto predeterminado de valores, en los que se estimará una probabilidad para cada posible resultado (p_i) o una distribución continua, f(x). Obviamente, esta función de distribución podría ser una regresión de las estimaciones discretas (p_i). Este caso correspondería, por ejemplo, a la estimación de las probabilidades asociadas a un fenómeno con dos posibles resultados; pérdida o ganancia.

Por otro lado, si el rango de resultados se desconoce a priori, siendo precisamente el objeto de la estimación, la asociación de una probabilidad deja de tener sentido, y la estimación se articulará el términos de valores discretos, x, o rangos de posibles resultados (x_1, x_2). Un ejemplo de este segundo tipo correspondería a la estimación del coste de un determinado componente de un edificio.

La diferencia entre ambos casos puede ser en ocasiones sutil, ya que en la estimación de un mismo concepto podría considerarse a priori un posible rango de variación o bien plantear ese intervalo como el objeto de la estimación.

i) Estimación sin probabilidad asociada (resultados desconocidos a priori)

En este caso, cabría una primera discusión acerca del número de estimaciones necesarias (n) para lograr una fiabilidad aceptable del resultado agregado. En este sentido, debe tenerse en cuenta que, desde el punto de vista teórico, la desviación estándar decrece al aumentar n, pues es proporcional al inverso de su raíz. Sin embargo, el número adicional requerido para reducirla un cierto porcentaje crece en proporción a n (Ferrell, 1985). Por tanto, existirá un óptimo de n a determinar en cada caso, en función de los recursos disponibles, si bien el contexto de trabajo en equipo impone normalmente una cierta n correspondiente al número de integrantes del grupo de trabajo.

De cara a la agregación de las diversas estimaciones obtenidas cabe plantear, de forma intuitiva, una integración mediante una media aritmética de las mismas. Sin embargo, estrictamente debería considerarse la fiabilidad de los diversos integrantes del equipo, según su experiencia, capacidad, familiaridad con la cuestión en estudio, etc., es decir,

$$x_G = \sum_{i=1}^{n} w_i \cdot x_i \qquad \text{(D.2.)}$$

Obviamente, esta consideración teórica ofrece una considerable dificultad de aplicación en lo referente a la obtención de estos pesos. Podría plantearse su estimación, por ejemplo, mediante autoevaluación, evaluación por el resto del grupo o bien a partir del historial profesional. De hecho existen varias propuestas para la realización de esta ponderación (DeGroot, 1974; McKinnon, 1966), si bien la conclusión general es que no se conoce ninguna manera de evitar totalmente esta problemática; sea cual fuere el método de ponderación, probablemente no estará exento en la práctica de dificultades y sospechas de diversa índole en lo referente a su fiabilidad. Como ejemplo de esta idea puede citarse la dependencia temporal de los pesos (Bates & Granger, 1969), o la consideración en esta ponderación del éxito de los sujetos en estimaciones precedentes (Roberts, 1965).

Por otro lado, los juicios aportados puede que no sean independientes, es decir, existe el peligro de que se dé una cierta correlación entre ellos. Baste pensar en el caso de una metodología de trabajo en equipo donde las estimaciones se realicen en voz alta; la infra o sobreestimación de uno de los sujetos puede influir y dar lugar a errores en el resto de participantes que emitirán su juicio con posterioridad (Hogarth, 1978).

ii) Estimación de probabilidades sobre resultados conocidos a priori

Respecto a la forma de agregación de probabilidades en el caso de resultados conocidos, pueden distinguirse dos casos, según se tomen los juicios de forma discreta o se aproximen mediante funciones de probabilidad continuas.

En el caso discreto, Ferrell (1985) afirma que puede optarse por una media aritmética de las diversas opiniones o una media ponderada, asignando un peso a cada persona según el grado de fiabilidad que transmitan, de manera que topa con la dificultad comentada anteriormente relativa a la estimación de esos pesos.

Por otro lado, Morris (1983) y Bordley (1982a y 1982b) proponen una agregación basada en la revisión del juicio mediante el teorema de Bayes (véase la figura D.2), si bien su aportación cae en una cierta artificiosidad y excesiva complejidad, lo que penaliza su posible aplicación práctica.

- Agregación bayesiana con observaciones independientes (Morris, 1983):

$$p_G = \frac{\prod_{i=1}^{n} p_i(E)}{\prod_{i=1}^{n} p_i(E) + \prod_{i=1}^{n} \left[1 - p_i(E)\right]}$$

- Agregación bayesiana con dependencia o no calibración (Bordley, 1982):

$$p_G = \frac{\prod_{i=1}^{n} \left(\frac{p_i}{p_0}\right)^{w_i}}{\prod_{i=1}^{n} \left(\frac{p_i}{p_0}\right)^{w_i} + \prod_{i=1}^{n} \left(\frac{1 - p_i}{1 - p_0}\right)^{w_i}}$$

Figura D.2. Formas de agregación de estimaciones de la probabilidad discretas mediante el teorema de Bayes.

La aplicación de la media ponderada, finalmente, comportaría las dificultades citadas anteriormente respecto a la estimación de los pesos y encontraría inconsistencias en el cálculo de probabilidades condicionadas, las cuales conllevan una multiplicación de dos estimaciones (Goodwin & Wright, 1999). En la tabla D.3 se observa cómo el cálculo de una probabilidad condicionada a partir de diversas estimaciones puede variar dependiendo del modo en que se calcule la media de las estimaciones de los diversos sujetos relativas a las probabilidades de los sucesos considerados.

	PROB. SUCESO A p(A)	PROB. SUCESO B p(B)	PROB. AMBOS SUCESOS p(A∩B)
SUJETO 1	PA1	PB1	PA1·PB1
SUJETO 2	PA2	PB2	PA2·PB2
MEDIA	(PA1+PA2)/2	(PB1+PB2)/2	(PA1·PB1+PA2·PB2)/2 ≠ 1/2·(PA1+PA2)·1/2·(PB1+PB2)

Tabla D.3. Limitaciones de la aplicación de la media en estimaciones de probabilidades condicionadas (a partir de Goodwin & Wright, 1999)

A pesar de estas dificultades, Einhorn & Hogarth (1975) recomiendan el uso de la media aritmética en aras a la sencillez de aplicación, incluso en caso de no ser consistente teóricamente, mientras que Goodwin & Wright (1999), abogan por la utilización de la media aritmética en aras a la simplicidad y facilidad de aplicación.

Para distribuciones continuas, Ferrell (1985) vuelve a distinguir entre la combinación bayesiana (Morris, 1983), y la combinación lineal. La primera de ellas propone el uso de la regla de Bayes y deduce una fórmula multiplicativa para combinar las diversas funciones de distribución de probabilidad subjetiva, $f_i(x)$,

$$f_G(x) = k \cdot C(x) \cdot \prod_{i=1}^{n} f_i(x) \qquad \text{(D.3.)}$$

donde k es una constante normalizadora que impone que la integral sea la unidad y C(x) es una función que modeliza la falta de calibración y dependencia entre los diferentes sujetos. Obviamente, como el mismo Ferrell (1986) reconoce, la obtención de ese C(x) de manera teóricamente correcta e intuitiva es extremadamente compleja, lo que ha provocado que la aplicación práctica de esta formulación haya sido más bien nula.

Posteriormente, Winkler (1968) propuso una alternativa mediante distribuciones de probabilidad tipo beta,

$$r_G = \sum_{i=1}^{n} w_i \cdot r_i ; \qquad n_G = \sum_{i=1}^{n} w_i \cdot n_i ; \qquad \text{(D.4.)}$$

donde r_G y n_G son los parámetros de la distribución conjugada y r_i y n_i los de las distribuciones estimadas por cada sujeto. La razón de escoger la distribución beta se basa en que los parámetros iniciales de la distribución normal –la otra posible alternativa– no son la suma de los de las distribuciones, a pesar de ser también una "familia de conjugación natural"[1]. El mismo autor (Winkler, 1981) también desarrolló un modelo de agregación que asume explícitamente la correlación entre las distintas distribuciones de probabilidad subjetivas, y propone la manera de calcular esas correlaciones. Otras aportaciones similares al respecto son la de Bordley (1982), cuyo objeto es la estimación de cantidades desconocidas, y la de Agnew (1983), el cual

[1] Una "familia de conjugación natural" se define como aquella cuya agregación es de la forma de las distribuciones iniciales (Ferrell, 1986).

aporta pesos para modelizar la calibración y la dependencia basados en estimaciones o juicios pasados.

En definitiva, el método más sencillo y fácilmente aplicable es el de la combinación lineal,

$$f_G(x) = \sum_{i=1}^{n} w_i \cdot f_i(x) \qquad \text{(D.5.)}$$

donde $f_i(x)$ es la distribución de probabilidad estimada por cada uno de los sujetos. Obviamente, si las suma de los pesos es 1 la función agregada tendrá las propiedades de una función de distribución, aunque mixta[2], e incluso multimodal si el grado de consenso es reducido. Además, la varianza de la agregación será mayor que la de las funciones componentes. En cualquier caso, la efectividad y fiabilidad de estos métodos de agregación es un aspecto abierto al estudio (Salomon, 1982).

D.2.2. La evaluación de los riesgos puros

D.2.2.1. Los elementos del riesgo puro

Tal como se comentaba en el capítulo 2, tradicionalmente se han identificado dos elementos básicos integrantes del concepto de riesgo puro:

- la probabilidad del riesgo
- la severidad del riesgo

Recientemente pueden encontrarse ciertas variantes de este binomio; "probabilidad y magnitud" (Lochart & Roberds, 1996), "probabilidad y severidad que producen la magnitud del efecto" Tah & Carr (2000), etc. Sin embargo, todas ellas rondan entorno a la misma idea. Algunos autores (Flanagan & Norman, 1993) distinguen un tercer elemento importante - la predictabilidad – que hace referencia a la posibilidad de estimar la probabilidad de ocurrencia del suceso o de sus consecuencias. Sin embargo, este aspecto puede considerarse más que como un elemento del concepto como una característica de uno de sus elementos; la probabilidad.

D.2.2.2. La evaluación de la probabilidad de riesgo

La estimación de la probabilidad y intensidad ha sido el aspecto del riesgo más tratado en ingeniería por su relación con el dimensionamiento y cálculo en la etapa de diseño. Se han aplicado elementos de teoría estadística fundamentalmente en la determinación de acciones, tales como la altura máxima de oleaje, el caudal de avenida, la intensidad de sismo, la velocidad máxima de viento, etc.

---

[2] La forma de la distribución de probabilidad agregada no conserva la forma de las $f_i(x)$, entre otras cosas porque estas tienen en general formas distintas.

En este sentido, Casteleiro (1986) aporta una interesante síntesis acerca del tratamiento de los riesgos puros en el ámbito de la construcción, centrándose en la cuantificación de la probabilidad de ocurrencia y la magnitud del riesgo asociada. El citado autor propone una distinción entre fenómenos continuos (de duración no despreciable con respecto al periodo de retorno) como oleaje, viento, etc., y fenómenos discretos (movimientos sísmicos y similares). Desde el punto de vista matemático, Casteleiro (1986) propone una modelización matemática de ambos según dos funciones:

- Fenómenos continuos: R_T (e)=P(L>e al menos una vez en T)
- Fenómenos discontinuos: P_{NT} (n)=Probabilidad de ocurrencia

En el primero de los casos, T es el tiempo considerado (duración de los intervalos del muestreo) y e la intensidad del riesgo (altura de oleaje, velocidad del viento, etc.). En el segundo caso, N_T es el número de fenómenos que se producen en un tiempo T (ocurrencia de un sismo, por ejemplo). El mismo autor propone también en este caso una función $F_Y(y)$, que describe la probabilidad de intensidad del fenómeno, supuesta su ocurrencia.

En definitiva, el autor anterior observa siempre dos tipos de incertidumbres asociadas a los riesgos; una incertidumbre de ocurrencia, P_{NT} (n), y una incertidumbre asociada a la intensidad (R_T (e) y $F_Y(y)$).

En el caso de los fenómenos discontinuos, Casteleiro (1986) llega a la expresión,

$$R_T(e) = G_Y(e) \cdot E(N_T) \qquad \text{(D.6.)}$$

que permite calcular la magnitud del riesgo a partir de la función de distribución acumulada de la intensidad del fenómeno, G_Y (e), y la medida de ocurrencia en el plazo de tiempo considerado.

$$E(N_T) = \sum_{n=0}^{\infty} N \cdot P_{N_T}(n) \qquad \text{(D.7.)}$$

A pesar de su indudable interés, la propuesta de Casteleiro (1986) se ciñe, como él mismo indica, a la estimación de la intensidad del riesgo (altura de oleaje, caudal de avenida, etc.), considerando un cierto periodo de retorno o probabilidad de ocurrencia. Su aportación tiene, por tanto, una clara orientación hacia el cálculo y dimensionamiento de proyectos constructivos, y no tanto a aspectos de gestión, si bien los primeros pueden considerarse englobados en estos últimos. De ello se deduce que su distinción entre fenómenos continuos y discontinuos constituye una caracterización para su tratamiento matemático, y no pretende introducir ninguna componente significativa de tipo conceptual referente a la esencia del riesgo. Por tanto, cabría plantear engarzar el tratamiento de este autor en un enfoque más general, que englobe no sólo la estimación de la intensidad del riesgo sino sus consecuencias, y que se encuadraría, por tanto, en un marco más general.

D.2.2.3. La evaluación de la severidad del riesgo

a) La estimación cualitativa de la severidad

La articulación de la estimación de la severidad del riesgo ha sido tratada tradicionalmente de una forma más bien cualitativa, principalmente en el ámbito medioambiental, asociando una categoría verbal al posible impacto del riesgo estudiado, mediante términos como “severo”, “medio” o “leve”.

b) Los modelos físicos de daño

Sin embargo, cabe citar la reciente aparición de modelizaciones físicas del daño en determinados ámbitos de la ingeniería, como por ejemplo la propuesta por Maldonado et al. (1998), en la que propone una estructuración de la cuantificación del daño producido en los puentes por efecto del sismo.

En cualquier caso, se trata de modelizaciones con un alcance limitado por su propio carácter físico, que serían integrables en un enfoque transversal o de gestión como métodos específicos de cuantificación, cuya aplicación dependerá de los condicionantes temporales de la toma de decisión. En consecuencia, dicha formulación será de utilidad en el ámbito de la gestión, aunque más bien en la vertiente calculística relativa a la estimación de la magnitud de ciertos riesgos puros, y siempre desde una perspectiva más bien parcial o específica.

D.2.2.4. La integración clásica severidad-probabilidad

El modo tradicional de integrar la probabilidad y la severidad asociadas a un riesgo ha sido la multiplicación de ambas. Ejemplo de ello podemos encontrarlo en propuestas como la de Koga (1996) o Blumstein (1996). En cualquier caso, esta solución no deja de ser una aplicación más del criterio del valor esperado, considerando únicamente dos sucesos: ocurrencia o no del factor de riesgo. En la tabla D.4 queda reflejada esta idea.

	Probabilidad	**Severidad**
Ocurrencia del riesgo	p	s
No ocurrencia del riesgo	1-p	0
Valor esperado (VE)	$VE=p\cdot s+(1-p)\cdot 0=p\cdot s$	

Tabla D.4. Visualización de la integración clásica entre severidad y probabilidad

D.3. EL USO DE LA MATEMÁTICA DIFUSA EN LA EVALUACIÓN DEL RIESGO

Según lo explicado en el apartado 2.4. de esta tesis, la matemática difusa conlleva principalmente una nueva vía para el tratamiento de los riesgos especulativos, si bien cabría plantear la cuestión de la integración con estos de los riesgos puros.

En este sentido, recientemente han aparecido tratamientos más sofisticados entre los que destaca el modelo de evaluación de riesgo propuesto por Tah & Carr (2000). Dicho modelo aborda la difícil tarea de la evaluación de la severidad de los riesgos en los proyectos de construcción mediante una rigurosa estructuración, articulada analíticamente mediante elementos de matemática difusa. Sin embargo, a pesar de su indudable interés, su aportación no está exenta de las importantes lagunas que invariablemente conlleva el intento de tratamiento de un aspecto tan extenso e incierto como el de los riesgos constructivos.

La citada metodología se basa en la estimación cualitativa de los efectos del riesgo con base en sus dos componentes principales; su probabilidad y su severidad, mediante unas matrices formadas por lo que denomina "Fuzzy Associative Memories" (FAM), y que en definitiva consisten en una definición de relaciones entre la probabilidad y la severidad que definen la magnitud del efecto con una escala cualitativa con los siguientes términos; H, MH, M, LM, L, donde la H representa la palabra "High" (alto), la M "Medium" (medio) y la L "Low" (bajo). Tanto la probabilidad, a la que representa mediante la notación "L'", como la severidad (V') y la magnitud del efecto (E') se expresan con la citada escala de medida cualitativa.

Por tanto, para cada factor de riesgo se calcula la magnitud de su efecto mediante la expresión,

$$\begin{aligned} L' \circ M_{LE} &= E_{L'} \\ V' \circ M_{VE} &= E_{V'} \\ E' &= E_{L'} \wedge E_{V'} \end{aligned} \tag{D.8.}$$

y posteriormente se calcula el efecto conjunto de todos los riesgos mediante el operador de unión difuso (o "t-conorma"),

$$E' = E'_1 \cup E'_2 \cup \ldots E'_m \tag{D.9.}$$

Sin embargo, dado que según Cox (1999) el citado operador produce resultados que no son realistas en la práctica, estos autores abogan por la alternativa de calcular el efecto conjunto mediante el máximo de los efectos de todos los riesgos, lo cual es, en sus propias palabras una aproximación muy pesimista o conservadora.

Por tanto, según reconocen Tah & Carr (2000), el modo de integrar los efectos del riesgo no queda resuelto. De hecho, admiten que el cálculo del máximo se propone "como buen punto de partida", pero no como una solución definitiva. Para intentar enmendar esta carencia, proponen un coeficiente corrector, ξ, que multiplicaría al valor del máximo riesgo obtenido para modelizar con más exactitud la magnitud resultante a partir de los efectos del resto de riesgos. Sin embargo, dejan la articulación del cálculo de este factor para posteriores investigaciones, lo cual pone aún más de manifiesto el carácter experimental y poco consolidado del método propuesto. Por otro lado, el intento de introducción de este coeficiente no hace sino mostrar aún de forma más clara que la integración de los efectos de los diversos riesgos es un aspecto aún sin solucionar.

Finalmente, este método propone la estimación de los efectos en términos relativos a cuatro niveles; tiempo (T), coste (C), calidad (Q) y seguridad (S), mediante unas matrices de términos FAM similares a las descritas anteriormente y estimadas por el usuario de la metodología;

$$\begin{aligned} E' \circ M_{ET} &= T' \\ E' \circ M_{EC} &= C' \\ E' \circ M_{EQ} &= Q' \\ E' \circ M_{ES} &= S' \end{aligned} \qquad \text{(D.10.)}$$

La integración de los efectos de los distintos riesgos se realiza según el criterio del máximo explicado anteriormente.

D.4. BIBLIOGRAFÍA

Agnew, C.E. (1983) “Multiple Probability Assesments by Dependent Experts” (Report No.36J). Stanford University, Economic Department (Program in Information Policy).

Bates, J.M. & Granger, C.M.J. (1969) “The Combination of Precasts”. Operational Research Quarterly, 20, 451-468.

Blumstein, G. (1996) “FAST Diagramming: A Technique to Facilitate Design Alternatives”. SAVE International Proceedings, 1996.

Bordley, R.F. (1982a) “The combination of forecasts: A bayesian approach”. Journal of the Operational Research Society”, 33, 171-174.

Bordley, R.F. (1982b) “A multiplicative formula for aggregating probability assessments”. Management Science, 28, 1137-1148.

Casteleiro, M. (1986) “Concepto de riesgo. Desarrollo histórico y su tratamiento estadístico”. En “Riesgos naturales en ingeniería civil” (publicación conjunta). Ed. UPC.

Cox, E. (1999) “The fuzzy systems Handbook”. Ed. Academic Press. (2ª edición).

DeGroot, M.H. (1974) “Reaching a consensus”. Journal of the American Statistical Association, 69, 118-121.

De Pablo, A., Ferruz, L., Santamaría, R., Urquizu, P. (1987) “Análisis práctico de las decisiones de inversión y financiación”. Ed. Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales. Universidad de Zaragoza.

Einhorn H.J. & Hogarth R.M. (1975) “Unit Weighting Schemes for Decision Making”. Organizational Behaviour and human Performance, 13, 171-192.

Ferrell, W.R. (1985) “Combining Individual Judgements”, en Wright, G. (ed.) “Behavioural Decision Making” (pp 111-145).Ed. Plenum Press, Nueva York.

Flanagan, R. & Norman, G. (1993) Risk Management & Construction, Blackwell Science.

Goodwin, P. & Wright, G. (1999) “Decision Analysis For Management Judgment”. Ed. John Wiley & Sons.

Hogarth, R.M. (1978) “ A note on aggregating opinions”. Organizational Behavior and Human Performance, 21, 40-46.

Hogarth, R.M. & Makridakis, S. (1981) “ Forecasting and Planning: An Evaluation”, Management Science, 227, 115-138.

Kenzner, H. (2001) "Project Management. A system Approach to Planning, Scheduling and Controlling". Ed. Van Nostrand Reinhold.

Koga, M. (1996) "Probability, Risk, and Value Engineering in Construction". SAVE International Conference Proceedings, 1996.

Lockhart, C.W. & Roberds, W.J. (1996) "Worth the risk?". Civil Engineering, 66 (4), 62-64. Nueva York.

Maldonado, E., Canas, J.A. y Casas, J.R. (1998) "Estudio de parámetros en la vulnerabilidad sísmica de puentes". Ed. Monografías de ingeniería sísmica / CIMNE: 28. (Barbat, A.H., ed.).

McKinnon, W.J. (1966) "Development of the SPAN technique for making decisions in human groups". American Behavioral Scientist, 9, 9-13.

Morris, P.A. (1983) "An Axiomatic Approach to Expert Resolution". Management Science, 29, 1, 24-32.

Roberts, H.V. (1969) "Probabilistic Prediction". American Statistical Association Journal, 60, 50-62.

Salomon, J. (1982) "Probability Assesment by Individual Auditors and Audit Teams: An Empirical Investigation". Journal of Accounting Research, 20. 689-710.

Tah, J.H.M., Deng, V., Carr, (2000) "A proposal for construction project risk assessment using fuzzy logic". Construction Management & Economics, 18 (4), 491-500.

Winkler, R.L. (1968) "Using Probability in Management Practice". Ed. Wiley.

Winkler, R.L. (1981) "Combining Probability Distributions from Dependent Information Sources". Management Science, 27, 479-488.