

## **FUZZY DECISION-SUPPORT SYSTEM FOR THE ASSESSMENT OF SUSTAINABILITY, TAKING INTO ACCOUNT UNCERTAINTY**

Quintela Sánchez, Brais; Del Caño Gochi, Alfredo; De la Cruz López, M.Pilar  
Universidade da Coruña

MIVES is a sustainability assessment method based in requirement trees, value functions, indicators weighting and, optionally, the Analytic Hierarchy Process (AHP). As a deterministic method, it cannot adequately reflect the uncertainty affecting some of the sustainability indicators. In the same way, MIVES cannot consider the potential subjectivity that could exist when establishing the indicators weighting or the value functions. A possible solution is the construction of hybrid, fuzzy-MIVES models, performing fuzzy mathematical operations on MIVES-type models, for taking into account uncertainty. In this paper the X-Fuzzy system is presented; it is a Microsoft Excel® add-on computer application that, among other potential applications, allows for generating fuzzy-MIVES models. This kind of models should be used all along the project life-cycle, periodically and when uncertainty varies, as a help in making decisions for achieving the sustainability objective of the project. The paper also includes a case study related to the environmental sustainability assessment of a specific structural mass concrete.

**Keywords:** Sustainability; Assessment; Uncertainty; MIVES; Fuzzy mathematics

## **SISTEMA DIFUSO DE APOYO EN LA EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD, TENIENDO EN CUENTA LA INCERTIDUMBRE**

MIVES es un método de evaluación de la sostenibilidad basado en árboles de requerimientos, funciones de valor, ponderación de indicadores de sostenibilidad y, optativamente, en el proceso analítico jerárquico (Analytic Hierarchy Process: AHP). Es un método determinista que, por tanto, no puede reflejar adecuadamente la incertidumbre inherente a algunos de los indicadores de sostenibilidad; tampoco puede hacerlo con la posible subjetividad a la hora de definir las ponderaciones de dichos indicadores o sus funciones de valor. Una potencial solución a ello es la construcción de modelos híbridos del tipo MIVES-difuso, que tengan en cuenta la incertidumbre por medio de la realización de operaciones matemáticas difusas sobre modelos de base tipo MIVES. En esta comunicación se presenta el sistema X-Fuzzy, que corre sobre Microsoft Excel® y que, entre otras posibles aplicaciones, permite construir modelos del tipo MIVES-difuso. Este tipo de modelos se deben usar durante todo el ciclo de vida del proyecto, a lo largo del cual la incertidumbre va variando, como ayuda en la toma de decisiones que lleven al cumplimiento del objetivo de sostenibilidad del proyecto. Esta comunicación incluye también un caso práctico de evaluación de la sostenibilidad ambiental de un hormigón en masa.

**Palabras clave:** Sostenibilidad; Evaluación; Incertidumbre; MIVES; matemática difusa.

Correspondencia: Alfredo del Caño Gochi - [alfredo@udc.es](mailto:alfredo@udc.es); M. Pilar de la Cruz López - [pcruz@udc.es](mailto:pcruz@udc.es)

Agradecimientos: Nuestro agradecimiento a D<sup>a</sup> Lucía Bordello Malde por su ayuda en el caso práctico presentado.

## 1. Introducción.

En esta comunicación se presenta una aplicación informática genérica, que sirve para realizar operaciones de aritmética difusa con números positivos. En particular, aquí se usa para aplicar el método MIVES-difuso (de la Cruz et al., 2015b), que se apoya en el método MIVES (Gómez et al., 2012; de la Cruz et al. 2015a). MIVES es un método determinista, basado en el uso de árboles de requerimientos (Figura 1), del análisis de valor (Alarcón et al. 2011) y del Proceso Analítico Jerárquico (*Analytic Hierarchy Process*: AHP; Saaty 2006).

REQ.	CRITERIOS		RIESGOS		INDICADORES	
ÍNDICE DE SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL	Uso de recursos (C1)	18,1%	Consumo de Recursos (K1)	40%	Consumo de agua (I1)	23,9%
					Consumo de áridos (I2)	40,3%
	Vertidos(C2)	12,5%	Eutrofización (K3)	66,7%	Consumo de aditivo(I3)	15,3%
					Acidificación (K4)	33,3%
	Emisiones(C3)	36,3%	Calentamiento Global (K5)	40%	Total energía (I5)	33,3%
					Niebla de verano (K6)	16%
			Reducción de la capa de ozono(K7)	24%	Emisiones eq. de fosfatos (I7)	100%
			Contaminación Acústica (K8)	12%	Emisiones equiv. de SO <sub>2</sub> (I8)	100%
			Olor (K9)	8%	Emisiones eq. de CO <sub>2</sub> (I9)	100%
	Ecosistemas (C4)	17,7%	Alteración de hábitats (K11)	100%	Emisiones eq. De C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (I10)	100%
	Gestión Ambiental (C5)	1,8%	Certificaciones de las empresas productoras (K12)	100%	Reducción capa ozono Pt (I11)	100%
	Uso del suelo (C6)	4,5%	Uso del suelo (K13)	100%	Emisiones sonoras (I12)	100%
	Residuos (C7)	9,1%	Generación de RSU (K14)	65%	Olor (I13)	100%
			Consumo de residuos (K15)	35%	Alteración de hábitats (I14)	100%
					Certificaciones ISO9000,14000, EMAS (I15)	100%
					Superficie afectada (I16)	100%
					Cantidad Generada de RSU (I17)	100%
					Uso de materiales reciclados (I18)	100%

**Figura 1. Árbol de requerimientos y pesos del modelo de evaluación de la sostenibilidad ambiental de hormigones en masa (Bordello et al. 2015).**

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) genera como resultado un listado de valores que toman los diferentes indicadores de sostenibilidad. Hacer comparaciones en base a dichos listados resulta difícil o imposible, ya que cada una de las diferentes alternativas a comparar tendrá ventajas e inconvenientes con respecto a las demás. MIVES es un método multicriterio de apoyo en la decisión que permite integrar todas esas evaluaciones en una sola. Permite trabajar con variables cualitativas y cuantitativas, expresadas en diferentes unidades, transformándolas a una misma unidad común, llamada valor o índice de satisfacción. Esto se hace a través de las denominadas *funciones de valor*. Por otro lado, tiene en cuenta la importancia relativa de los diferentes aspectos de la evaluación. Este método ha sido aplicado a la evaluación de la sostenibilidad y a la toma de decisiones en campos muy diferentes, entre los que se encuentran la ingeniería de la construcción y la energía (Aguado et al. 2012, Casanovas et al. 2014, Cartelle et al. 2015, Cuadrado et al. 2015, de la Fuente et al. 2016, entre otros muchos).

Cuando se estima el nivel de sostenibilidad de un sistema constructivo, resulta obvio que existe incertidumbre acerca de los valores reales, finales, que pueden tomar los indicadores de sostenibilidad, no sólo a causa de su posible variabilidad, sino también con motivo de posibles cambios que se pueden producir a lo largo del proyecto. Esto complica la gestión del objetivo de sostenibilidad (de la Cruz y del Caño 2015).

Una forma de tener en cuenta dicha incertidumbre es combinando MIVES con la simulación estocástica (del Caño et al. 2012, Gómez et al. 2015, de la Cruz et al. 2015a). El sistema aquí presentado sirve también para dicho propósito, pero en este caso combinando MIVES con la matemática difusa (de la Cruz et al. 2015b).

Los autores han desarrollado la herramienta informática genérica X-Fuzzy, de uso gratuito, que corre sobre Microsoft Excel® y sirve para realizar determinados tipos de operaciones de aritmética difusa, de forma fácil y rápida. En particular, resulta de ayuda para combinar MIVES con la aritmética difusa. Por supuesto, X-Fuzzy puede emplearse para otros tipos de propósitos. A continuación se resumen los métodos y técnicas usados para la realización de la herramienta. Finalmente, se incluye un ejemplo de aplicación a la evaluación de la sostenibilidad ambiental de una estructura de hormigón, de acuerdo con el árbol de requerimientos de la Figura 1.

## 2. El método.

### 2.1. La base del método: MIVES.

La primera etapa de MIVES consiste en definir el problema a resolver y las decisiones que hay que tomar. A continuación se elabora un esquema jerárquico en la forma de árbol de requerimientos (Figura 1), en el que se incluyen todos los indicadores que intervienen en la evaluación. Para cada indicador se definirá una función de valor, cuya misión ya ha sido explicada con anterioridad. El siguiente paso es la definición de la importancia o peso relativo de cada aspecto que se tiene en cuenta en la evaluación.

MIVES se basa en la teoría general multicriterio de toma de decisiones. Las unidades y magnitudes de los diferentes indicadores del modelo se convierten a una unidad común, adimensional, llamada valor o grado de satisfacción. Con respecto a un conjunto de alternativas  $x \in X$  a comparar entre sí, se puede considerar la existencia de una función de valor  $V: P \rightarrow R$  tal que  $P_x > P'_x \leftrightarrow V(P_x) > V(P'_x)$ , donde  $P$  es el conjunto de atributos o indicadores a evaluar para la alternativa  $x$ . Se puede establecer una función de valor  $V(P)$  que integra todos los indicadores de la evaluación. La solución (Gómez et al. 2012; de la Cruz et al., 2015a) es una función  $V$ , suma de las  $N$  funciones de valor  $V_i$  correspondientes a los  $N$  indicadores del modelo. En problemas cuyo árbol de requerimientos está estructurado en tres niveles, la función resultante  $V$  toma la forma de la Ecuación (1):

$$V(P) = \sum_{i=1}^{i=N} \alpha_i \cdot \beta_i \cdot \gamma_i \cdot V_i(P_i) \quad (1)$$

En esta ecuación,  $V(P)$  mide el grado de sostenibilidad para la alternativa que está siendo evaluada;  $\alpha_i$  y  $\beta_i$  son los pesos de los criterios y riesgos (Figura 1) a los que pertenece el indicador  $i$ ;  $\gamma_i$  son los pesos de los diferentes indicadores;  $V_i(P_i)$  representa las funciones de valor usadas para medir el grado de sostenibilidad de la alternativa bajo estudio respecto a un indicador  $i$  determinado; y, finalmente,  $N$  es el número total de indicadores que se tienen en cuenta en la evaluación. Los pesos  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$  y  $\gamma_i$  son factores que representan la preferencia o importancia relativa, respectivamente, de ciertos indicadores ( $\gamma_i$ ), riesgos ( $\beta_i$ ), y criterios ( $\alpha_i$ ) sobre los demás. La Figura 1 muestra los pesos que se han establecido en el modelo aquí usado.

En otro orden de cosas, MIVES (Gómez et al. 2012, de la Cruz et al. 2015a) utiliza la Ecuación (2) para las funciones de valor continuas  $V_i$ .

$$V_i = \frac{1 - e^{-m_i \cdot \left( \frac{P_i - P_{i,\min}}{n_i} \right)^{A_i}}}{1 - e^{-m_i \cdot \left( \frac{P_{i,\max} - P_{i,\min}}{n_i} \right)^{A_i}}} \quad (2)$$

En esta ecuación,  $P_i$  es el valor que toma el indicador  $i$  para la alternativa que se está evaluando, que normalmente se va a asociar a un valor o índice de satisfacción  $V_i$  entre 0 y 1 (o entre 0 y 100).  $P_{i,\min}$  y  $P_{i,\max}$  son los valores mínimo y máximo que puede tomar  $P_i$  a efectos de la evaluación, y que se asocian al mínimo y máximo índices de satisfacción (0 y 1, o bien 0 y 100); si el indicador tomase valores inferiores a  $P_{i,\min}$ ,  $V_i$  seguirá valiendo 0, si tomase valores superiores a  $P_{i,\max}$ ,  $V_i$  seguirá valiendo 1 (o bien 100).  $A_i$ ,  $n_i$ , y  $m_i$  son factores de forma utilizados para generar funciones de valor cóncavas, convexas, en forma de S o de línea recta. La geometría de las funciones  $V_i$  hace posible considerar no linealidades en la evaluación, permitiendo establecer una mayor o menor exigencia a la hora de satisfacer los requisitos de un indicador determinado. Por su parte, el divisor de la Ecuación (2) asegura que la función de valor devolverá un valor dentro del rango [0, 1] y que la contribución máxima a la sostenibilidad vendrá asociada al valor unidad. En el caso de variables discretas las funciones de valor tienen forma escalonada.

Una vez definidas las funciones de valor hay que calcular los pesos  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$ , y  $\gamma_i$  de cada una de las ramas del árbol de requerimientos, lo cual puede hacerse de forma directa por expertos en la materia. En caso de árboles de cierta complejidad, o en casos en los que existan discrepancias entre dichos expertos, puede ser útil el uso de AHP, ya comentado, que ayuda a evitar incoherencias y subjetividad en el establecimiento de pesos. No obstante, teniendo en cuenta la debilidad que supone el uso de etiquetas semánticas en AHP (Gómez et al. 2012, de la Cruz et al. 2015a), es recomendable un proceso posterior de análisis, contraste y modificación de los pesos resultantes, si es el caso.

El lector puede encontrar información adicional y una explicación más detallada del método MIVES en Gómez et al. (2012; en español) y de la Cruz et al. (2015a; en inglés).

## 2.2. Aritmética difusa.

El sistema aquí presentado se basa en la teoría de conjuntos difusos (de la Cruz et al., 2015b), también llamados borrosos, y en particular en el uso de números difusos. Concretamente, en la aplicación de MIVES y de sus fórmulas (1) y (2), en las cuales ahora los parámetros sometidos a incertidumbre son números difusos. El resultado es otro número difuso que representa la incertidumbre acerca de los posibles valores que podría tomar el índice de sostenibilidad global de un proyecto o sistema constructivo.

En los conjuntos no difusos (de la Cruz et al. 2015b), un elemento  $x$  solo puede tener dos valores de pertenencia:  $\mu(x)=1$  si pertenece al conjunto y  $\mu(x)=0$ , si no pertenece (Figura 2). Un caso particular de un conjunto no difuso es aquel que sólo contiene un elemento; esto puede representarse por medio de un conjunto difuso llamado *singleton* (Figura 2) en el que dicho elemento tiene valor de pertenencia, a dicho conjunto, igual a 1. Por el contrario, el valor de pertenencia de un elemento a un conjunto difuso puede variar entre 0 y 1:  $\mu(x) \in [0,1]$ , como se puede observar en la Figura 2.

Siendo  $U$  un conjunto universal, se define un subconjunto difuso  $A$  de  $U$  por su función de pertenencia  $\mu_A: U \rightarrow [0,1]$ , asignando un número real  $\mu_A(x)$  en el intervalo [0,1] a cada

elemento  $x \in U$ , donde el valor de  $\mu_A(x)$  es el grado de pertenencia de  $x$  a  $A$ . Esto podría expresarse de la forma:  $A = \{(x, \mu_A(x)) : x \in U, \mu_A(x) \in [0, 1]\}$ . Por el contrario, para un conjunto no difuso,  $\mu_A(x) = 1$  si  $x \in A$  y  $\mu_A(x) = 0$  si  $x \notin A$  (Figura 2).

En base a la definición anterior se va a proceder a explicar el significado de una operación clave para el método computacional aquí usado. Dado un conjunto difuso  $A$  en  $U$  y cualquier número real  $\alpha \in [0, 1]$ , un alfa-corte de  $A$  es el conjunto  ${}^\alpha A = \{x \in U : \mu_A(x) \geq \alpha\}$ ,  $\alpha \in [0, 1]$ . Por tanto, un alfa-corte es un corte, realizado a un conjunto difuso, mediante una línea horizontal (Figura 3). Un rastreo, realizando infinitos alfa-cortes de un conjunto difuso, contiene toda la información relativa a la geometría exacta de dicho conjunto.

Un alfa-corte estricto es el conjunto  ${}^\alpha A = \{x \in U : \mu_A(x) > \alpha\}$ . Además, un conjunto difuso es convexo si  $\mu_A(\lambda x + (1-\lambda) \cdot y) \geq \min\{\mu_A(x), \mu_A(y)\}$ ,  $\forall x, y \in U$  y  $\forall \lambda \in [0, 1]$ . El concepto de convexidad difusa es similar al de convexidad de una función matemática convencional no difusa,  $y = f(x)$ . Finalmente, un conjunto difuso es normal, o normalizado, cuando su función de pertenencia tiene, al menos, un elemento  $x \in U$  con un valor de pertenencia igual a 1; es decir, al menos existe un  $x \in U : \mu_A(x) = 1$ . En otros casos, se dice que el conjunto difuso no está normalizado.

Basándonos en los conceptos antedichos, un número difuso es un conjunto difuso normalizado y convexo de la recta real  $R$ . Tiene una función de pertenencia continua con, al menos, un punto  $M \in R$ , que cumple  $\mu_A(M) = 1$  ( ${}^{\alpha=1} A = M$ ). Los números difusos pueden tener diferentes formas geométricas que reflejan posibles circunstancias reales. La Figura 2 muestra las representaciones de un conjunto no difuso (determinista), uno difuso y un *singleton*, ya mencionados.

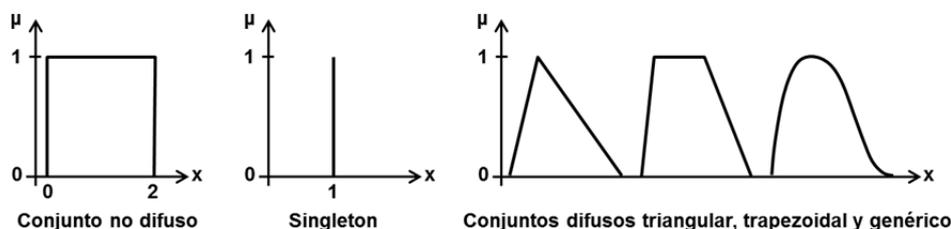


Figura 2. Ejemplos de conjuntos difusos, no difuso y *singleton*.

El método computacional llamado DSW (Dong, Shah y Wong 1985), o de alfa-cortes, es el que se ha utilizado aquí para operar con cualquier tipo de números difusos, incluyendo combinaciones de números difusos y conjunto difusos discretos. El algoritmo correspondiente se basa en definir primeramente un valor de  $\alpha$ , tal que  $0 \leq \alpha \leq 1$ . El siguiente paso es la obtención de los dos valores correspondientes a ese alfa-corte de los dos números difusos con los que hay que operar; es decir, se calculan los dos valores correspondientes a cada alfa-corte, en forma de intervalo. A partir de ello, mediante matemática de intervalos, se realizan los cálculos oportunos, que en este caso van a ser las operaciones incluidas en las fórmulas (1) y (2). Para cada una de dichas operaciones, y a su vez para cada alfa-corte de cada pareja de números difusos a operar, se obtiene un resultado en la forma intervalo de salida. Así, por ejemplo, si hay que sumar dos números difusos  $M$  y  $N$ , se hallará el alfa-corte para  $\alpha=0$  de ambos números, obteniéndose dos intervalos  ${}^{\alpha=0} M = (M_a, M_b)$  y  ${}^{\alpha=0} N = (N_a, N_b)$ ; el intervalo de salida, en este caso será  ${}^{\alpha=0} (M+N) = (M_a+N_a, M_b+N_b)$ . Esta dinámica se repite incrementando  $\alpha$  en un intervalo pequeño, hasta definir correcta y totalmente la geometría del número difuso de salida; por

ejemplo, si se realizan incrementos de  $\alpha=0.1$ , se generarán 11 alfa-cortes, desde  $\alpha=0$  hasta  $\alpha=1$ , y luego se unirán entre sí los diferentes extremos de los intervalos de salida, para formar el número difuso que es resultado de la operación. La Figura 3 refleja un ejemplo de número difuso y el concepto de alfa-corte.

Por su parte, la Figura 4 refleja la forma en que se borrosifican (se hacen difusos) parámetros probabilistas discretos, y la forma de calcular los correspondientes alfa-cortes. Finalmente, las variables que no estén sometidas a incertidumbre ni a subjetividad, o cuya incertidumbre (o subjetividad) sea irrelevante, o cuya incertidumbre no influya de forma apreciable en los resultados de la evaluación (tras averiguar que esto es así por medio de un análisis de sensibilidad), se tomarán como deterministas (*singletons*).

Conceptualmente, operar con intervalos positivos ( $I = [a, b] \in R^+$ :  $a \leq b$ ) es relativamente fácil, ya que solo es necesario realizar directamente las operaciones con los límites inferiores y superiores. En el caso de dos intervalos  $I_1 = [a, b]$  e  $I_2 = [c, d]$  ( $a, b, c, d \in R^+$ ,  $a \leq b$ ,  $c \leq d$ ), las operaciones de intervalos necesarias para los modelos de tipo MIVES, incluidas en las fórmulas (1) y (2), son las siguientes:

$$\begin{aligned}
 I_1 + I_2 &= [a + c, b + d] \\
 I_1 - I_2 &= [a - d, b - c], a \geq d, b \geq c \\
 k \times I_2 &= [k \times c, k \times d] \\
 I_1 \times I_2 &= [a \times c, b \times d] \\
 1 \div I_2 &= [1 \div d, 1 \div c], I_2 \in R_0^+ \\
 I_1 \div I_2 &= [a \div d, b \div c], I_2 \in R_0^+ \\
 e^{I_1} &= [e^a, e^b] \\
 I_1^k &= [a^k, b^k] \\
 I_1^{I_2} &= [a^c, b^d]
 \end{aligned} \tag{3}$$

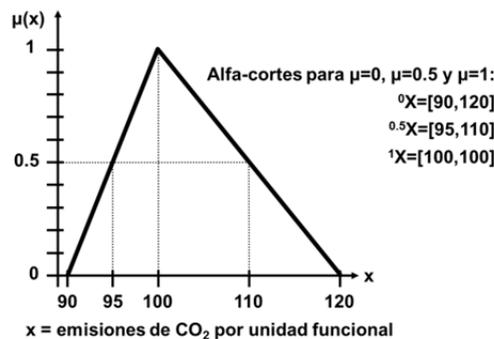


Figura 3. Ejemplo de número difuso para una variable cuantitativa, y concepto de alfa-corte.

### 2.3. El método MIVES-Difuso.

La **primera fase** de este método (de la Cruz et al., 2015b) consiste en escoger los parámetros que se ven afectados por una incertidumbre relevante (variables difusas). En la **segunda fase** se estiman los valores que toman las variables deterministas y difusas, por

medio de bases de datos o juicio de expertos. No existen bases de datos con funciones de distribución o números difusos de indicadores de sostenibilidad, pero sí es posible estimar valores extremos y más frecuentes (modales). Ello lleva al uso de números difusos triangulares, que son fáciles de entender (son similares a funciones de distribución triangulares), sencillos de estimar, pueden configurarse como asimétricos, y en los cuales el valor más frecuente se asocia al alfa-corte  $\alpha=1$  (valor más posible del número difuso, con un valor de pertenencia igual a la unidad).

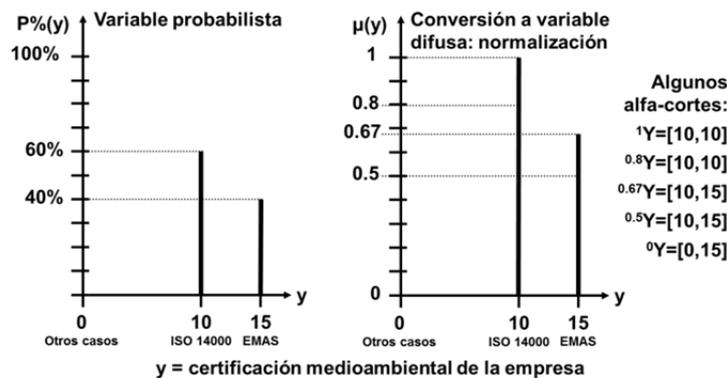


Figura 4. Ejemplo de conjunto difuso para variables discretas, y sus alfa-cortes.

Para variables continuas con valores equiprobables se pueden utilizar intervalos convencionales, análogos a las funciones de distribución uniformes. En caso de que haya más de un valor “más posible” (de la misma forma que puede haber rangos de valores modales) se pueden emplear números difusos trapezoidales (Figura 2).

La **tercera fase** del método consiste en realizar los cálculos difusos anteriormente expuestos, para obtener el correspondiente índice de sostenibilidad (IS) difuso. Es esencial que las variables difusas tengan valores que se ajusten a la realidad. Al menos las estimaciones de  $\alpha=0X$  y  $\alpha=1X$  deben ser realistas (valores mínimo, máximo y más frecuente). Si la geometría de estos números difusos no se ajusta perfectamente a los hechos reales no es un problema importante. Si las estimaciones de los parámetros clave antedichos son fiables, es mejor aplicar este método (o la simulación estocástica) que emplear modelos deterministas, que no aportan información alguna con respecto a la incertidumbre.

En cuanto al uso de los resultados del cálculo, se puede mostrar directamente a los usuarios la gráfica del IS, que será un número difuso (borroso) diferente de los triangulares o trapezoidales que se hayan empleado en el cálculo (véase la Figura 6). Esto haría posible distinguir rápidamente ciertos resultados clave:  $IS_{min}$ ,  $IS_{max}$  y  $\alpha=1IS$ ; este último es el valor más posible, análogo (pero no igual) al valor modal; en caso de haber más de un valor correspondiente a  $\alpha=1IS$ , lo llamaremos “rango más probable”, y podemos usar como valor más posible el valor central de dicho rango.

Para una mayor ayuda en la toma de decisiones es preferible mostrar también un conjunto de parámetros concretos, fácilmente comprensibles, que complementen a los anteriores para dar una idea clara del grado de incertidumbre acerca del posible IS final real y, con ello, del riesgo de no conseguir el objetivo de sostenibilidad deseado. El proceso por el que se generan estos parámetros se denomina desborrosificación, y constituye la **cuarta fase** del método. De la Cruz et al. (2015b) han propuesto varios parámetros de ayuda. Uno es el rango, como diferencia entre los potenciales valores mínimo y máximo del IS ( $\alpha=0IS$ ), similar

al rango de una función de distribución. Otro es el área del IS difuso ( $A_{IS}$ ). Otro es la media de las diferencias entre el centro de gravedad de los diferentes segmentos del IS difuso ( $IS_{gci}$ , para  $i = 1$  hasta  $n$  segmentos) y su centro de gravedad global  $IS_{GC}$ . De la Cruz et al. (2015b) han denominado varianza del número difuso ( $VarFN$ ) a este parámetro:

$$VarFN = [(IS_{g1} - IS_{GC})^2 + (IS_{g2} - IS_{GC})^2 + \dots + (IS_{gn} - IS_{GC})^2] \div n \quad (4)$$

Como consecuencia, también podría usarse la raíz cuadrada de  $VarFN$  ( $\sigma_{FN}$ ). Cuanto mayores sean el rango, el área,  $VarFN$  y  $\sigma_{FN}$ , mayor será la incertidumbre.

Otro parámetro interesante es el valor del IS que deja el 95% del área del IS difuso a su derecha ( $IS_{A95\%}$ ). Es un valor conservador que ayuda a establecer estimaciones prudentes del potencial valor real del IS. El concepto de  $IS_{A95\%}$  puede ser generalizado, y se pueden calcular otros parámetros similares, dejando diferentes porcentajes del área del IS difusa a su derecha (50%, 85%, por ejemplo;  $IS_{Ap\%}$ ). Se trata de parámetros similares (pero no iguales) a los percentiles.

Un parámetro clave es el relacionado con la posibilidad de llegar a un determinado IS objetivo. Se trata de un parámetro similar (pero no igual) a la probabilidad de alcanzar dicho IS objetivo. Se calcula como el cociente entre el área a la derecha del IS objetivo ( $IS_{obj}$ ) y el área total del IS difuso ( $A_{IS}$ ), expresado como un porcentaje:

$$Pos(SI \geq SI_{obj}) = A_{derecha}(SI_{obj}) \div A_{SI} \quad (5)$$

En la **quinta fase** del método se deben analizar los resultados obtenidos, y tomar decisiones. Las fases anteriores se realizan periódicamente, en diferentes momentos del proyecto o del ciclo de vida del producto, y cuando hay grandes cambios en los mismos.

La **sexta fase** del método es crucial, y consiste en reunir información acerca de los resultados reales, para generar una base de datos histórica que permita perfeccionar los modelos de sostenibilidad futuros y hacer estimaciones más precisas, en proyectos futuros.

### 3. La aplicación.

#### 3.1. Introducción.

Como se ha anticipado, X-Fuzzy funciona sobre Microsoft Excel®. Esta aplicación ha sido desarrollada empleando el lenguaje de programación Microsoft *Visual Basic for Applications* (VBA), específico para desarrollar aplicaciones que deban correr sobre Microsoft Office.

Al abrir el archivo XLSM que contiene la aplicación X-Fuzzy, en el menú de Excel aparece un nuevo sub-menú o pestaña (Figura 5), denominada X-Fuzzy, que contiene todos los iconos o botones necesarios para realizar los oportunos cálculos del método MIVES-Difuso, de manera rápida y sencilla.

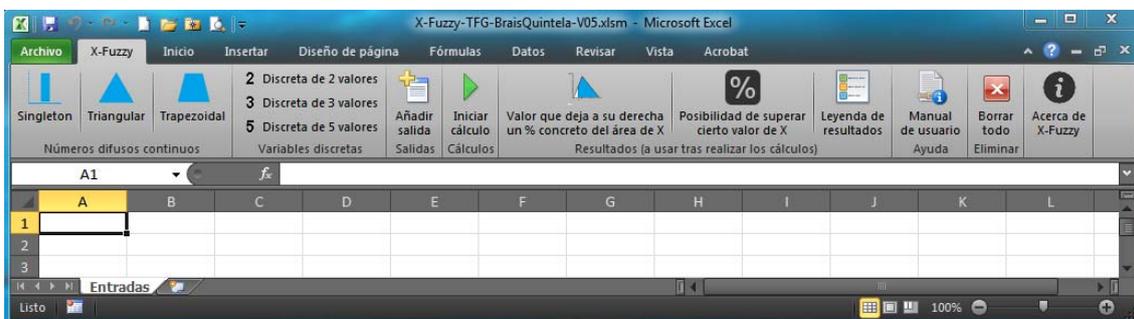


Figura 5. Menú de X-Fuzzy.

La pestaña X-Fuzzy integra ocho grupos de botones, o iconos. Los botones de los grupos **Números difusos continuos** y **Variables discretas** abren formularios para introducir variables difusas en cualquier celda de la primera hoja electrónica, que se denomina **Entradas** (Figura 5). El icono **Añadir salida** muestra un formulario que permite introducir en la celda activa una fórmula que opera con variables difusas. El botón **Iniciar cálculo** realiza las operaciones matemáticas difusas sobre la celda activa en el momento de hacer clic en este icono; a su vez, abre dos hojas electrónicas nuevas, denominadas **Alfacortes** y **Resultados**, en los que el usuario puede encontrar, respectivamente, los cálculos intermedios y los resultados globales de cálculo. Finalmente, los iconos del grupo **Resultados**, a usar con posterioridad al icono de **Iniciar cálculo**, sirven para realizar determinados cálculos específicos que se han comentado anteriormente en el apartado 2.3, así como para acceder a una leyenda que explica el significado y la utilidad de los parámetros de cálculo. Existen otros iconos, que se pueden observar en la Figura 5, cuya utilidad es obvia (manual de usuario, limpieza de la hoja, etc.).

### 3.2. Generación del modelo.

Lo primero que se debe hacer es introducir los valores que toman las variables de entrada del modelo. Para introducir variables difusas continuas se pueden usar los iconos **Triangular** y **Trapezoidal**. Los números no difusos se pueden introducir de la forma normal en Excel o por medio del icono **Singleton**. Los iconos **Discreta de 2 valores**, **Discreta de 3 valores** y **Discreta de 5 valores** permiten, como su propio nombre indica, introducir variables discretas que pueden tomar 2, 3 o 5 valores (véase la Figura 4). En todos los casos se abre un formulario de ayuda en la introducción de datos, si bien el usuario puede hacer manualmente dicha introducción. Así, por ejemplo, para introducir el número difuso triangular (1,3,7) hay que teclear =FuzzyTr(1;3;7).

Tras introducir los datos de entrada hay que hacer lo propio con las oportunas fórmulas del modelo, que operan con los números difusos anteriormente introducidos. De la misma forma que antes, este paso puede realizarse a través del icono **Añadir salida** y de su correspondiente formulario, o bien de forma manual, tecleando la fórmula de la manera habitual en Excel. Las operaciones difusas que ofrece X-Fuzzy son las necesarias para modelos MIVES; es decir, las usadas en las fórmulas (1) y (2).

### 3.3. Cálculos y resultados.

Una vez generado el modelo se procede al cálculo, de la forma ya comentada. Lo oportuno es desplazarse a la hoja **Resultados**, en la cual se muestran los valores correspondientes a cada  $\alpha$ -corte de la variable de salida activa al pulsar el icono **Iniciar cálculo**. Estos valores son los que definen el número difuso  $X$  que se buscaba. También se incluye una gráfica con dichos valores, que representa dicho número difuso, de la forma que se puede ver en la Figura 6. Además de otros resultados intermedios y finales, en esta hoja se consignan también los parámetros difusos complementarios de ayuda en la toma de decisiones, ya comentados: mínimo ( $X_{\min}$ ), máximo ( $X_{\max}$ ), rango, rango de valores más posibles (Rango  $\mu^{(x)=1}X$ ), valor central de este último rango (Centro  $\mu^{(x)=1}X$ ), área del número difuso, VarFN,  $\sigma_{FN}$ , e  $IS_{A95\%}$ .

Por su parte, el icono **Valor que deja a su derecha un % concreto del área de X** permite calcular diferentes valores similares (pero no iguales) a los percentiles. Finalmente, el botón **Posibilidad de superar cierto valor de X** permite calcular el parámetro  $Pos(SI \geq SI_{obj})$ , ya comentado, similar (pero no igual) a la probabilidad de alcanzar un determinado objetivo de sostenibilidad.

#### 4. Caso práctico.

Sea la evaluación de un hormigón en masa estructural con resistencia característica de 30 N/mm<sup>2</sup>. El árbol de requerimientos del modelo es el ya visto en la Figura 1, que se corresponde con un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de tipo “cuna a puerta”, desde que se extraen las materias primas hasta que se vende la unidad funcional de hormigón en masa. El árbol se ha estructurado en tres niveles: criterios, que sirven para desglosar ordenadamente el requerimiento de sostenibilidad medioambiental; riesgos, que se refieren a posibles impactos consecuencia de la producción de una unidad funcional de hormigón; e indicadores, que son los parámetros que se miden. La unidad funcional es la tonelada de hormigón en masa. La dosificación es la siguiente:

- Agua: 175 kg/m<sup>3</sup> de hormigón.
- Cemento CEM II/A-M(V-L) 42.5R: 351 kg/m<sup>3</sup> de hormigón.
- Arena (hasta 4 mm): 1.004 kg/m<sup>3</sup> de hormigón.
- Gravilla (4-16 mm): 625 kg/m<sup>3</sup> de hormigón.
- Grava (10-20 mm): 242 kg/m<sup>3</sup> de hormigón.
- Superfluidificante Bettor Melcret 222: 7 kg/m<sup>3</sup> de hormigón.

Del total de indicadores (a la derecha de la Figura 1), una parte se han establecido como difusos, por considerarse que existe incertidumbre acerca del valor que pueden tomar, por razones de variabilidad, combustibles utilizados, o tipo de proceso industrial, entre otras. El resto de indicadores se han tomado como deterministas. Los valores que toman dichos indicadores se han obtenido de publicaciones científicas, de bases de datos de ACV y de DAPs de este tipo de productos (Declaración Ambiental de Producto). Los parámetros de las funciones de valor utilizadas para los diferentes indicadores, así como los valores de entrada al modelo, se consignan en la Tabla 1.

En la Figura 6 puede observarse el número difuso resultante de aplicar el método aquí propuesto. Dicho número representa el conjunto de posibles valores que puede tomar el Índice de Sostenibilidad (IS) de una tonelada de hormigón estructural en masa con la dosificación comentada, junto con sus valores de pertenencia.

En la Tabla 2 se muestran algunos de los resultados obtenidos en el cálculo. A partir de la Figura 6 y de la Tabla 2 se observa que existe una incertidumbre relevante ( $\sigma_{FN}=0,0825$ ) acerca del posible índice de sostenibilidad (IS) que puede tener el hormigón comentado que, en todo caso, supone impactos ambientales reseñables ya que, en una escala de 0 a 1, el IS puede tomar valores de sostenibilidad desde los muy bajos ( $IS_{min}=0,35$ ) hasta los medios ( $IS_{max}=0,62$ ), siendo 0,41 ( $IS_{A95\%}$ ) una estimación conservadora (y pobre, de bajo nivel de sostenibilidad) acerca del posible valor que podría tomar el IS en la realidad. Los valores “centrales”, respectivamente similares a la media, la moda y la mediana (pero no iguales a dichos parámetros) son también bastante pobres (respectivamente,  $IS_{GC}=0,52$ ,  $\mu^{(IS)=1}IS=0,58$  y  $IS_{A50\%}=0,54$ ). Lo mismo que se ha hecho aquí se puede hacer con otras dosificaciones diferentes, por ejemplo disminuyendo la cantidad de clinker o de cemento (que son la causa de los principales impactos) en base a su sustitución por adiciones, con objeto de hacer comparaciones y escoger la dosificación más respetuosa con el medio ambiente.

**Tabla 1: Datos de las funciones de valor y de entrada de cada indicador.**

Riesgo	Indicador	Entrada de cada indicador	Datos de las funciones de valor					
			X <sub>min</sub>	X <sub>max</sub>	P	K	C	
Consumo de recursos	Consumo de agua [l/m <sup>3</sup> ]	175,62	220	110	1	0,01	121	
	Consumo de áridos [kg/m <sup>3</sup> ]	1872	2300	1000	1	0,01	2170	
	Consumo de aditivo [kg/m <sup>3</sup> ]	7,024	10,5	3,5	1	0,01	9,8	
	Consumo de cemento [kg/m <sup>3</sup> ]	351,2	500	200	1	0,01	470	
Consumo energético	Total energía [MJ/m <sup>3</sup> ]	(2150; 2769,26; 3680)	4500	2000	2	0,7	2750	
	% de energía renovable [%]	42,2	0	100	2,84	0,5	50	
Eutrofización	Emisiones eq. de fosfatos [g-eq PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> /m <sup>3</sup> ]	(47,2; 120; 5380)	7000	20	3	0,5	2040	
Acidificación	Emisiones eq. de SO <sub>2</sub> [g-eq SO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> ]	(297; 2630; 3970)	6000	2000	3	0,5	3510	
Calentamiento global	Emisiones eq. de CO <sub>2</sub> [kg-eq CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> ]	(211; 347,91; 484)	800	200	3	0,52	276	
Reducción de la capa de ozono	Destruc. capa de ozono [mg CFC/m <sup>3</sup> ]	(0,0048; 4,71; 12,6)	25	0,004	3,22	0,47	10	
Contaminación acústica	Emisiones sonoras [Nivel de emisiones]	Medio	MB	B	M	A	MA	
			1	0,8	0,6	0,2	0	
Olor	Olor [Nivel de olor]	Bajo	B	M	A			
			1	0,5	0			
Alteración de hábitats	Alteración de hábitats [Nivel de alteración]	Alto	B	M	A			
			1	0,5	0			
Certif. de las empresas productoras	Certificación ISO9000, 14000, EMAS [Nivel de certificación]	2	1: sin las básicas	2: básicas	3: básicas + EMAS			
			0	0,7	1			
Uso del suelo	Reducción superficie acopio y vertido [Nivel de reducción]	N	N	MB	B	M	A	MA
			0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
Generación de RSU	Cantidad generada de RSU [kg/m <sup>3</sup> ]	(1,8; 3,6; 5,4)	10	0	3	0,5	3,6	
Consumo de residuos	Uso de materiales reciclados [%]	0	0	100	1	0,5	3	

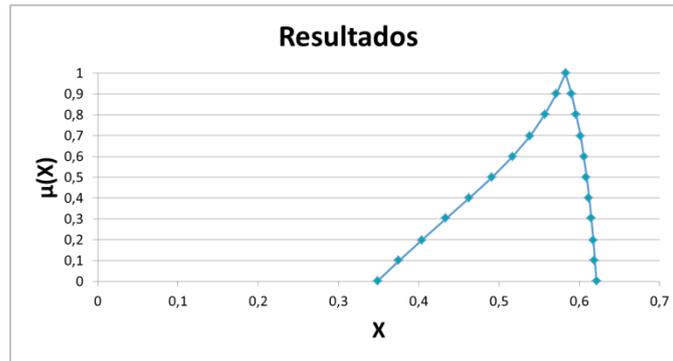


Figura 6. Índice de sostenibilidad difuso obtenido en el cálculo.

Tabla 2: Principales parámetros del índice de sostenibilidad difuso obtenido.

$IS_{min}$	$IS_{GC}$	$\mu^{(IS)=1}IS$	$IS_{max}$	$IS_{A50\%}$	$IS_{A95\%}$	$\sigma_{FN}$
0,35	0,52	0,58	0,62	0,54	0,41	0,0825

## 5. Conclusiones.

En la dirección de proyectos cada vez es más frecuente que se definan objetivos de sostenibilidad. La incertidumbre constituye un problema a la hora de estimar los posibles índices de sostenibilidad reales futuros, y tanto más en las etapas tempranas del proyecto.

La aplicación aquí presentada supone una ayuda para la gestión del objetivo de sostenibilidad, dando una idea más clara de las posibilidades que hay de alcanzar dicho objetivo. Esto facilita la toma de decisiones en tiempo útil, aumentando la probabilidad de cumplir con el mencionado objetivo.

Por lo demás, X-Fuzzy es una herramienta muy amigable que permite realizar los cálculos de manera fácil y ágil, siendo en realidad un instrumento de propósito general, que podría ser usado para otro tipo de cálculos.

## Referencias

- Aguado, A., del Caño, A., de la Cruz, M.P., Gómez, D., Josa, A. (2012). "Sustainability assessment of concrete structures within the Spanish structural concrete code". ASCE Journal of Construction Engineering and Management, nº 138(2), pp. 268-276.
- Alarcón, B., Aguado, A., Manga, R., & Josa, A. (2011). A value function for assessing sustainability: application to industrial buildings. Sustainability, 3(1), 35-50.
- Bordello, L., de la Cruz, M.P., del Caño, A. (2015). Informe final de Proyecto. Proyecto "Valorización de las conchas de bivalvos gallegas en al ámbito de la construcción"

- (Proyecto Biovalvo)". Apéndice sobre la Actividad 5, de evaluación de la sostenibilidad. Documento interno del Proyecto Biovalvo.
- Cartelle, J.J., Lara, M., de la Cruz, M.P., del Caño, A. (2015). Assessing the global sustainability of different electricity generation systems. *Energy* 89, 473-489.
- Casanovas, M.M., Armengou, J., Ramos, G. Occupational risk index for assessment of risk in construction work by activity. *Manage Constr Eng J* 2014; 10(3): 1-9. 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000785.
- Cuadrado, J., Zubizarreta, M., Pelaz, B., Marcos, I. Methodology to assess the environmental sustainability of timber structures. *Construction and Building Materials* 2015; 86: 149–158
- de la Cruz, M.P., del Caño, A. (2015). Propuestas preliminares para el establecimiento de procesos eficaces de gestión del objetivo de sostenibilidad en proyectos. *Proceedings of the AEIPRO-IPMA 19TH International Congress On Project Management and Engineering, Granada (Spain), July 15-17th, 2015, Proceedings*, pp. 01-001-1 to 01-001-13
- de la Cruz, M.P., Castro, A., del Caño, A., Gómez, D., Lara, M., Cartelle J.J. (2015a). Comprehensive methods for dealing with uncertainty in assessing sustainability. Part I: the MIVES – Monte Carlo method. In: *Soft Computing Applications for Renewable Energy and Energy Efficiency*. Eds: MS García-Cascales, JM Sánchez-Lozano, AD Masegosa, C. Cruz-Corona. IGI-Global (USA). Chapter 4, pp. 69-106.
- de la Cruz, M.P., Castro, A., del Caño, A., Gómez, D., Lara, M., Gradaille, G. (2015b). Comprehensive methods for dealing with uncertainty in assessing sustainability. Part II: the Fuzzy-MIVES method. In: *Soft Computing Applications for Renewable Energy and Energy Efficiency*. Eds: MS García-Cascales, JM Sánchez-Lozano, AD Masegosa, C. Cruz-Corona. IGI-Global (USA). Chapter 5, pp. 107-140.
- de la Fuente, A., Pons, O., Josa, A., Aguado, A. Multi-criteria decision making in the sustainability assessment of sewerage pipe systems. *Journal of Cleaner Production* 2016; 112(5): 4762-4770. 10.1016 / j.jclepro.2015.07.002
- del Caño, A., Gómez, D., de la Cruz, M.P. (2012) "Uncertainty analysis in the sustainable design of concrete structures: a probabilistic method". *Construction and Building Materials*, 37, December, 865–873. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.020>.
- Dong, W., Shah, H., & Wong, F. (1985). Fuzzy computations in risk and decision analysis. *Civil Engineering and Environmental Systems*, 2, 201–208.
- Gómez, D., del Caño, A., de la Cruz, M. P., & Josa, A. (2012). Metodología genérica para la evaluación de la sostenibilidad de sistemas constructivos - El método MIVES. In A. Aguado (Ed.), *Sostenibilidad y Construcción* (pp. 385-411). Barcelona, España: Asociación Científico-Técnica del Hormigón.
- Gómez, D., Purriños, R., del Caño, A., de la Cruz, M.P. (2015). Simulation system for managing uncertainty in the sustainable design of concrete structures. *Proceedings of the AEIPRO-IPMA 19TH International Congress On Project Management and Engineering, Granada (Spain), July 15-17th, 2015, Proceedings*, pp. 02-003-1 to 02-003-13
- Saaty, T.L. (2006). *Fundamentals of decision making and priority theory with the Analytic Hierarchy Process: (Vol. VI of AHP Series)*. Pittsburg, PA: RWS Publications.