

## MULTICRITERIA DECISION MAKING METHODOLOGIES APPLIED TO THE SELECTION OF BATS IN THE CERAMIC SECTOR: EQUALITARIA VS PRIORITISED WEIGHTING

Ibáñez-Forés, V.<sup>1</sup>; Aragonés, P.<sup>2</sup>; Bovea Edo, M. D.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universitat Jaume I, <sup>2</sup> Universitat Politècnica de València

This paper presents two methodologies to evaluate and select Best Available Techniques (BAT): a methodology based on equal weighting of criteria and the Analytic Hierarchy Process (AHP). The aim of this work is the identification of the most sustainable BATs for the ceramic industry.

To target these, 9 BAT options used in 13 alternative configurations of the ceramic tile manufacturing process have been considered and assessed on sustainability using relevant environmental, economic, technical and social indicators. After that, two multicriteria methodologies are applied.

The first one combines screening techniques, as the economic feasibility, with graphical comparisons. The second one is the AHP method, which is based on the preferences of a decision maker to prioritize criteria as well as technological alternatives. This method is widely used in multicriteria decision problems because it is a structured tool that simplifies complex decisions.

Applying both methodologies, the most sustainable scenario for the ceramic tiles industry combines heat recovery from flue gas with techniques to reduce noise or diffuse dust emissions and/or the flue gas depuration with CaCO<sub>3</sub> and/or Ca(OH)<sub>2</sub>.

**Keywords:** Best available techniques; Multicriteria decision making; Analytic hierarchy process

## METODOLOGÍAS DE TOMA DE DECISIÓN MULTICRITERIO APLICADAS A LA SELECCIÓN DE MTD EN EL SECTOR CERÁMICO: PONDERACIÓN IGUALITARIA VS PRIORITARIA

Este artículo presenta dos metodologías para evaluar y seleccionar Mejores Técnicas Disponibles (MTD): un método basado en la ponderación igualitaria de criterios y el Proceso Analítico Jerárquico (AHP). El objetivo es identificar qué MTDs aplicables al sector cerámico son más recomendables desde el punto de vista de la sostenibilidad.

Para ello, se definen 13 escenarios alternativos mediante la combinación de 9 MTDs aplicables al proceso de fabricación de baldosas cerámicas. Tras la obtención de indicadores ambientales, económicos, técnicos y sociales para cada escenario, se aplican dos metodologías.

La primera combina técnicas de cribado, según su viabilidad económica, y comparación gráfica de resultados. La segunda es el método AHP, que se apoya en las preferencias de un agente decisor para priorizar tanto criterios como alternativas tecnológicas bajo estudio. Dicho método es ampliamente utilizado en problemas multicriterio por ser una herramienta muy estructurada que simplifica decisiones complejas.

Aplicando ambas metodologías, los escenarios que combinan recuperación energética con técnicas de reducción de ruido, mitigación de emisiones difusas y depuración con CaCO<sub>3</sub> y/o Ca(OH)<sub>2</sub> son los identificados como mejores desde el punto de vista de la sostenibilidad.

**Palabras clave:** Mejores Técnicas Disponibles; Análisis multicriterio; Proceso Analítico Jerárquico

Correspondencia: M<sup>a</sup> Dolores Bovea Edo. Dpto. Ingeniería Mecánica y Construcción, Universitat Jaume I. C.P. 12071. Castellón, España.

## 1. Introducción

El desarrollo tecnológico ha sido considerado históricamente como la principal fuente efectiva de ventaja competitiva entre empresas, así como de crecimiento económico y beneficio social de los países (Afuah, 2000; Liao & Cheung, 2002 y Azzone & Manzini, 2008).

En la actualidad, las nuevas tecnologías se utilizan comúnmente como herramientas de minimización de los efectos negativos de los sistemas industriales sobre el medio ambiente (Musango & Brent, 2011). La aplicación de tecnologías de reducción del impacto ambiental facilita a las industrias el cumplimiento de los requisitos ambientales cada vez más exigentes impuestos desde Europa a través de la continua implantación de legislación ambiental (Directive 96/61/EC y Directive 2008/1/EC (Directivas IPPC) y Directive 2010/75/EU (Directiva DEI)).

En concreto, la Directiva DEI impulsa la aplicación de las Mejores Técnicas Disponibles (MTD) como medio para incrementar la sostenibilidad de las industrias. Ahora bien, existen numerosas posibilidades en cuanto a técnicas aplicables a un mismo sector. Los documentos BREF (Documentos de Referencia sobre las Mejores Técnicas Disponibles (MTD)), recogen una larga colección de MTDs propuestas por la Comisión Europea con posible aplicación a un determinado sector industrial.

La identificación de la tecnología óptima para cada caso, en base a la evaluación de la sostenibilidad y comparación de las numerosas alternativas, ha sido el objeto principal de numerosas investigaciones realizadas a lo largo de los últimos años. En esta línea, se han ido creando numerosos mecanismos de evaluación tecnológica, así como diferentes metodologías de análisis y apoyo a la toma de decisión (Tran & Daim, 2008).

Históricamente, son muchos los autores que han decidido ponderar igualitariamente todos los indicadores de sostenibilidad utilizados considerando que todos ellos tienen la misma importancia relativa. Los análisis con este enfoque terminan, generalmente, en la comparación directa de las opciones en función de sus atributos, bien numérica o gráficamente.

Ahora bien, las elecciones tecnológicas constituyen en su mayoría problemas multidimensionales con preferencias, requisitos o demandas diferentes para cada una de sus dimensiones. Por tanto, requieren de metodologías multicriterio basadas en enfoques de priorización de indicadores para poder identificar las mejores opciones (Brechet et al., 2009).

La elección de uno u otro enfoque representa una difícil decisión puesto que, tal y como remarca Gómez-López et al. (2009), la selección de la metodología a aplicar en tomas de decisión multicriterio varía casi exclusivamente con las características del problema.

El objeto de este estudio es analizar y comparar estos dos enfoques mediante su aplicación a la selección de la mejor combinación de MTDs aplicables al sector cerámico desde una perspectiva ambiental, económica, técnica y social. Para ello, a partir de una propuesta de 13 escenarios que combinan diferentes MTDs cuyos objetivos son fomentar la eficiencia energética y reducir las emisiones gaseosas, partículas, tanto difusas como canalizadas, y ruido, se aplicarán dos metodologías de toma de decisión multicriterio: una propia, basada en la ponderación igualitaria de indicadores, y una de ponderación prioritaria ampliamente extendida, el Proceso Analítico Jerárquico (AHP).

## 2. Definición de escenarios

A partir de un proceso tipo de fabricación de baldosas cerámicas en España, considerado como el escenario base del estudio, se realiza una propuesta de 13 escenarios alternativos. Estos escenarios se forman combinando las 9 MTDs seleccionadas del documento de referencia para la industria cerámica (EC, 2007) y que se detallan en la Tabla 1.

**Tabla 1. MTDs y medidas bajo estudio.**

Objetivo	MTD	Medidas
EFICIENCIA ENERGÉTICA	MTD 1	1a Recuperación del calor de gases sucios de salida mediante intercambiadores de calor
		1b Recuperación del calor de gases limpios de salida mediante intercambiadores de calor
DUST EMISSIONS (Channeled)	MTD 2	2a Filtros de mangas con pulsos de presión: filtros tradicionales con enfriadores
		2b Filtros de mangas con pulsos de presión: filtros de nueva generación (alta T <sup>o</sup> )
	MTD 3	Precipitadores electrostáticos (ESP)
DUST EMISSIONS (Diffuse)	MTD 4	4a Encerramiento de zonas de almacenamiento
		4b Instalación de sistemas de aspersión de agua
		4c Instalación de tolvas con aspiración
GASEOUS COMPOUNDS	MTD 5	5a Depuración vía seca: filtros de lecho fijo de adsorción con CaCO <sub>3</sub>
		5b Depuración vía seca: filtros de lecho fijo de adsorción con CaCO <sub>3</sub> modificado*
	MTD 6	Módulo de adsorción: módulos de panal de Ca(OH) <sub>2</sub>
	MTD 7	7a Depuración vía seca: filtros de mangas con adsorbedor (Ca(OH) <sub>2</sub> )
		7b Depuración vía seca: filtros de mangas con adsorbedor (NaHCO <sub>3</sub> )
	MTD 8	8a Depuración vía húmeda: utilizando agua con Ca(OH) <sub>2</sub> o CaCO <sub>3</sub>
		8b Depuración vía húmeda: utilizando sosa cáustica
	NOISE	MTD 9

\* CaCO<sub>3</sub> modificada: Compuesto de CaCO<sub>3</sub>/Ca(OH)<sub>2</sub>. Incrementa la porosidad y aumenta el contenido de hidróxido de calcio, por lo que aumenta la afinidad con los gases ácidos (mayor adsorción de los HF).

La Figura 1 muestra la combinación de las MTDs que configuran los 13 escenarios alternativos. Los detalles relativos a la configuración de los escenarios, incluyendo todos los factores y parámetros físicos considerados para optimizar la combinación de mejoras, tales como los caudales de gas, las temperaturas de trabajo o los puntos de rocío ácido del gas a tratar, pueden consultarse en Ibáñez-Forés et al. (2013).

**Figura 1. Configuración de escenarios a analizar**



### 3. Indicadores de sostenibilidad

Los indicadores de sostenibilidad seleccionados son los descritos en la Tabla 2, donde aparecen agrupados en indicadores ambientales, económicos, técnicos y sociales, junto con su escala y el análisis de su linealidad.

**Tabla 2. Descripción de los indicadores de sostenibilidad**

INDICADORES		DESCRIPCIÓN	ESCALA	LINEAL
C1. Amb	C1.1: EcoIndicador 99	El EcoIndicador-99 indica cuantitativamente el impacto ambiental global de un sistema mediante un único valor que integra todos los resultados de su Análisis de Ciclo de Vida.	Puntos	SI, inversa
	C2.1: Coste de Inversión	El Coste de Inversión (CI) representa cuantitativamente el capital inicial a desembolsar para poner en funcionamiento el equipo. Incluye gastos de adquisición e instalación y elementos auxiliares tales como aislamientos, conexiones, etc.	€	SI, inversa
C2. Económicos	C2.2: Coste Anual Total	El Coste Anual Total (CAT) incorpora el CI y los Costes de Operación y Mantenimiento que incluyen gastos energéticos, materiales y de servicios y costes fijos de mantenimiento.	€/año	SI, inversa
	C2.3: Ahorros Anuales Netos	Los Ahorros Anuales Netos (AAN) son la diferencia entre los CAT y los costes evitados, los cuales representan los ahorros de energía, agua, materias primas, etc. obtenidos con las MTD.	€/año	SI, directa
C3. Técnicos	C3.1: Mantenimiento	Indicador <u>cuantitativo</u> que valora el mantenimiento que conlleva cada técnica a partir del número, periodicidad y especialización de las actividades necesarias para el correcto funcionamiento de cada MTD.	Cualitativa	SI, inversa
	C3.2: Ruido	Indicador <u>cuantitativo</u> que evalúa la modificación en el nivel sonoro o presión acústica que se produce con la implantación de un equipo.	Cualitativa	SI, inversa
C4. Sociales	C4.1: Grado de conocimiento	Indicador <u>cuantitativo</u> que evalúa la percepción y aptitud a la adopción de las técnicas por parte del sector a través del conocimiento que sus expertos tienen sobre ellas.	Cualitativa	SI, directa
	C4.2: Implantación / Consolidación	Indicador <u>cuantitativo</u> basado en el grado de implantación actual de cada técnica a nivel nacional vinculado con la facilidad que hay para adquirir cada equipo.	Cualitativa	SI, directa

El indicador ambiental seleccionado es el Eco-Indicador 99 (Goedkoop & Spriensma, 2000) cuyo valor se obtiene mediante el modelado de los datos de inventario con el software SimaPro 7.3.2 (PRe Consultants, 2011).

Los indicadores económicos y técnicos se basan en datos secundarios obtenidos directamente de la bibliografía, principalmente del documento de referencia para la industria cerámica (EC, 2007). Por otro lado, los indicadores sociales se obtienen a partir de datos primarios procedentes de la realización de encuestas a diversos agentes relacionados con el sector cerámico.

Cabe señalar, que para la obtención de los indicadores cualitativos se han utilizado las escalas mostradas en la Tabla 3.

Además, se ha considerado, para los indicadores económicos y técnicos, que el valor correspondiente a cada escenario es el de la suma de aquéllos otorgados a las MTDs que lo integran. Por otro lado, el valor de los indicadores sociales para cada escenario corresponde con el valor promedio de las MTDs que lo integran.

Toda la información relacionada con el cálculo de dichos indicadores, así como todas las fuentes bibliográficas de donde se ha obtenido la información pertinente, se detallan en Ibáñez-Forés et al. (2013).

**Tabla 3. Descripción de las escalas para los indicadores de sostenibilidad cualitativos**

Mantenimiento		Ruido		Conocimiento/Accesibilidad	
Bajo	1	Reducción	-1	Aplicación nula/conocimiento nulo	1
Medio	2	Invariable (<3 dBA)	0	Algo aplicadas/algún conocimiento	2
Elevado	3	Incremento	1	Bastante aplicación/conocimiento general	3
Muy elevado	4			Amplia aplicación/profundo conocimiento	4

A continuación, la Tabla 4 resume el valor tomado por cada indicador de sostenibilidad para cada uno de los escenarios analizados y detallados en la Figura 1.

**Tabla 4. Indicadores de sostenibilidad**

		Indicadores								
		C1		C2			C3		C4	
		C1.1 (Pt)	C2.1 (€)	C2.2 (€/año)	C2.3 (€/año)	C3.1	C3.2 (cualitativos)	C4.1	C4.2	
<b>ESCENARIOS ALTERNATIVOS</b>	<b>1</b>	0,066	406.000	318.000	142.000	3	1	3,542	2,681	
	<b>2</b>	0,067	3.150.000	620.000	-132.000	2	0	3,208	1,689	
	<b>3</b>	0,065	348.000	157.000	331.000	1	1	3,743	2,645	
	<b>4</b>	0,113	554.000	212.000	302.000	2	1	2,889	1,514	
	<b>5</b>	0,115	554.000	246.000	279.000	2	1	2,889	1,514	
	<b>6</b>	0,095	750.000	443.000	45.000	3	0	2,375	1,514	
	<b>7</b>	0,068	959.000	378.000	82.000	3	1	3,181	1,764	
	<b>8</b>	0,069	950.000	474.000	51.000	3	1	2,861	1,546	
	<b>9</b>	0,068	959.000	419.000	41.000	3	1	3,181	1,764	
	<b>10</b>	0,068	959.000	515.000	39.000	3	1	2,861	1,546	
	<b>11</b>	0,068	1.817.000	548.000	-60.000	4	0	2,778	1,569	
	<b>12</b>	0,069	1.817.000	553.000	-65.000	4	0	2,778	1,569	
	<b>13</b>	0,069	196.000	119.000	369.000	1	-1	3,639	2,778	

#### 4. Método de priorización igualitaria de indicadores

El proceso de evaluación de las alternativas, bajo la consideración de que todos los criterios o indicadores considerados tienen la misma importancia, se divide en dos etapas: un primer análisis de viabilidad económica en el que se realiza un cribado inicial y una segunda etapa de comparación gráfica de alternativas.

##### 4.1 Cribado de las alternativas: viabilidad económica

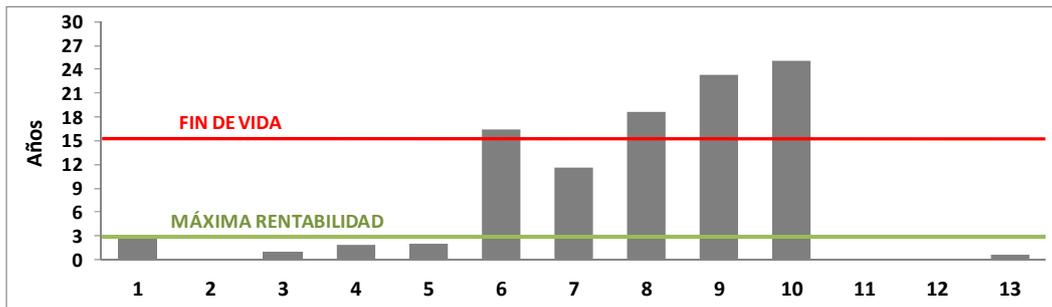
Según Schoenberger (2011), aquellas técnicas que cumplen con los requisitos para ser una MTD pero que no alcanzan la viabilidad económica se denominan técnicas “*beyond BAT*” y su instalación es considerada únicamente viable en escenarios de prueba cuyo objetivo sea facilitar su estudio para abaratarlas mediante su desarrollo técnico.

Por otro lado, según la Metodología de Costes (EC, 2006), una inversión se considera económicamente rentable o viable cuando su pay-back o periodo de retorno es inferior a 3 años, puesto que implica una recuperación del dinero a corto plazo con una importante reducción del riesgo a correr por el inversor. Por otro lado, una inversión se considera no viable si el periodo de recuperación del capital supera el tiempo de vida útil de la instalación, en nuestro caso establecido en 15 años.

El *pay-back* de la inversión se define como el tiempo necesario para que la empresa recupere la inversión inicial a partir de las ganancias que ésta genera y, por tanto, puede calcularse como el cociente entre la Inversión inicial y el Ahorro Anual Neto.

Por lo tanto, para evaluar la viabilidad económica de cada escenario y poder descartar las opciones inviables, se han calculado los respectivos *pay-backs* y se han representado en la Figura 2 en forma de gráfico de barras, en el que se han marcado con dos líneas horizontales tanto el período de máxima rentabilidad (línea verde), como el de inviabilidad (línea roja).

**Figura 2. Periodos de retorno de la inversión**



Analizando la Figura 2 podemos afirmar que los escenarios 1, 3, 4, 5, 7, y 13 son económicamente viables por permitir la recuperación del capital antes de finalizar su vida útil. Contrariamente, los escenarios 6, 8, 9 y 10 quedan fuera del plazo de recuperación límite de la inversión y, por tanto, el desembolso de capital no podrá recuperarse en su totalidad antes de finalizar la vida útil de las técnicas implantadas. Por lo tanto, dichos escenarios quedan descartados de nuestro estudio.

Tal y como muestra la Tabla 4, los escenarios 2, 11 y 12 conllevan unos costes de operación superiores a los beneficios generados con su implantación, por lo tanto, no aportan ningún tipo de Ahorro Anual Neto que permita recuperar la inversión realizada y por consiguiente también son descartados del análisis.

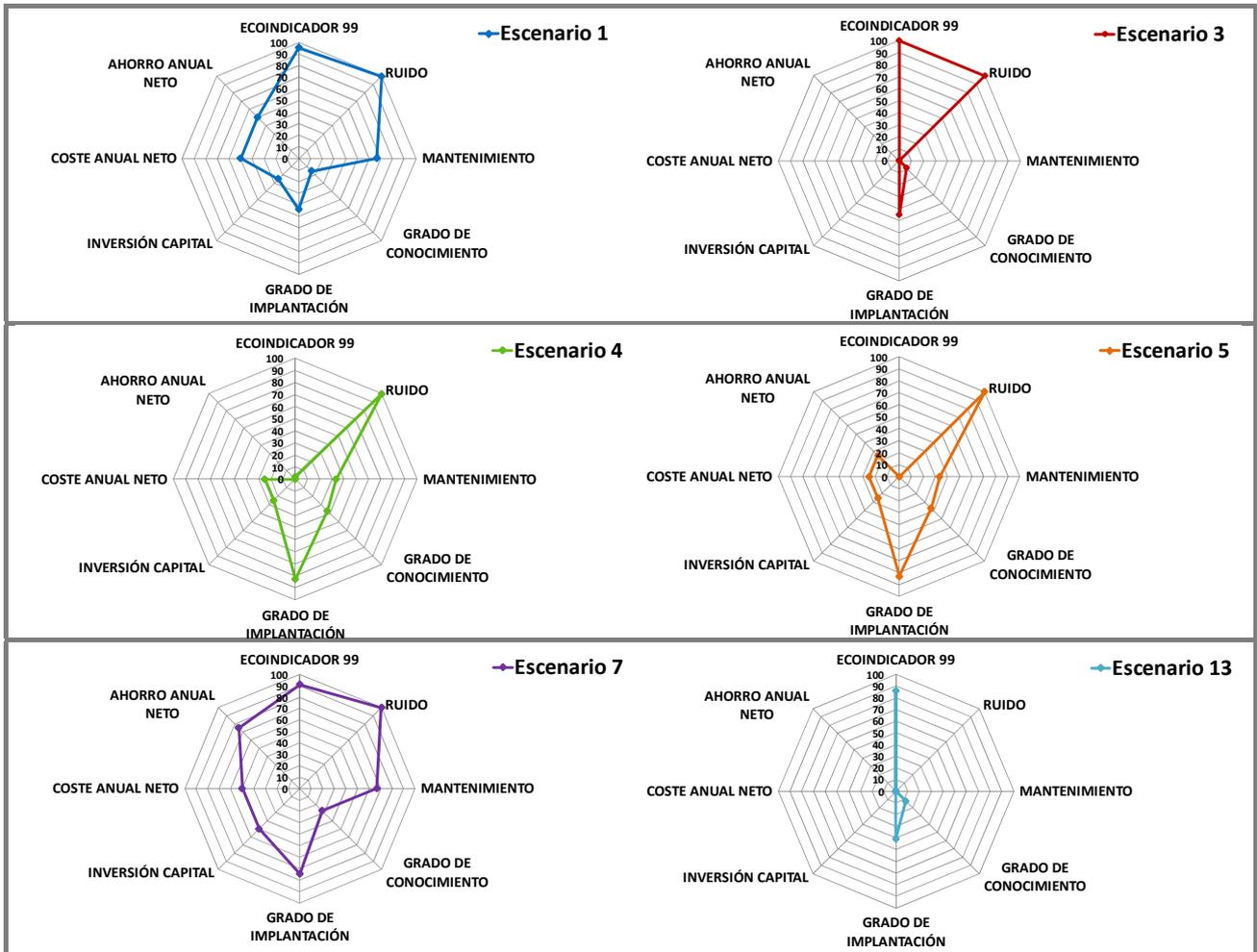
#### 4.2 Comparación de alternativas: representación gráfica

Una vez descartados los escenarios económicamente inviables, el resto de alternativas son comparadas en función de los indicadores de sostenibilidad. Para permitir dicha comparación y dada la diferente naturaleza de cada indicador, estos son normalizados siguiendo el siguiente enfoque (Afgan and Carvalho, 2004; Sadiq et al., 2005; Pilavachi et al., 2006; Wang et al., 2008):

Si el indicador es mejor cuanto menor sea:	Si el indicador es mejor cuanto mayor sea:
$Z_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{i\min}}{X_{i\max} - X_{i\min}}$	$Z_{ij} = \frac{X_{i\max} - X_{ij}}{X_{i\max} - X_{i\min}}$
donde: $i = 1, 2, \dots, n$ – número de indicadores de sostenibilidad $j = 1, 2, \dots, m$ – número de escenarios alternativos $Z_{ij}$ – valor normalizado del indicador $i$ para el escenario $j$ $X_{ij}$ – valor que toma el indicador $i$ para el escenario $j$ (sin normalizar) $X_{i\min} = \min(X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{im})$ – valor mínimo que toma el indicador $i$ de todos los escenarios $X_{i\max} = \max(X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{im})$ – valor máximo que toma el indicador $i$ de todos los escenarios	

Una vez normalizados, los indicadores son representados, tal y como muestra la Figura 3, en un gráfico poligonal o de “tela de araña” que permite plasmar el comportamiento ambiental, económico y tecno-social de cada alternativa. Analizando dichos gráficos identificamos el escenario 13, seguido del 4, 5 y 3, como los más sostenibles puesto que presentan un mejor comportamiento (área menor) para todos los indicadores analizados.

**Figura 3. Análisis de sostenibilidad mediante representación gráfica de indicadores**



[Tras la normalización, mejores comportamientos se representan con valores más pequeños, por lo tanto, el escenario óptimo será aquel con la menor área delimitada por las líneas de conexión en el diagrama poligonal.]

## 5. Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

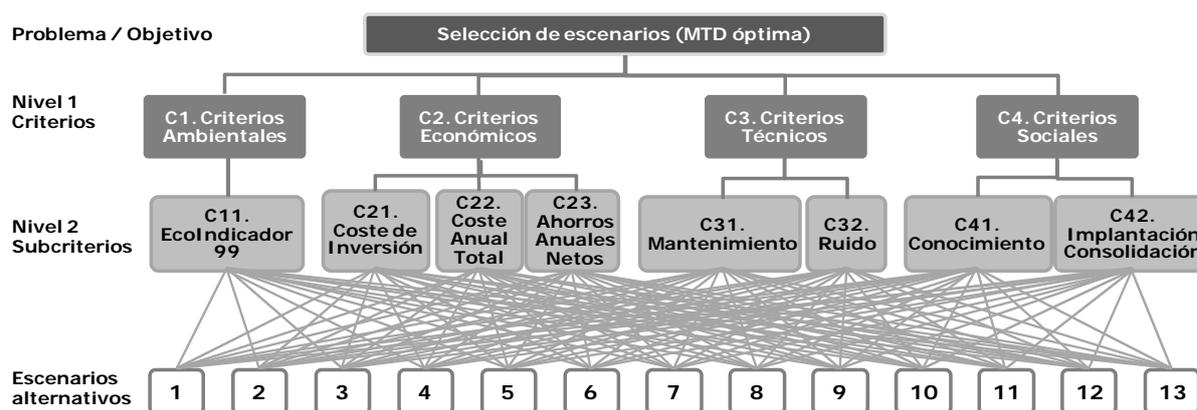
La metodología del *Analytic Hierarchy Process* (AHP), creada por Thomas L. Saaty en 1979 (Saaty, 1980), es una herramienta muy utilizada para la resolución de problemas de toma de decisión con múltiples objetivos. Su utilización es muy común a consecuencia de su habilidad para simplificar problemas complejos (Pilavachi et al., 2009).

El primer paso para su aplicación es la determinación del Agente Decisor (AD) que será el agente encargado de tomar la decisión final. En nuestro caso, el AD lo conforma un equipo de tres ingenieros industriales con amplia experiencia en el campo de la producción de baldosas cerámicas. A pesar de que dichos expertos tienen un conocimiento profundo sobre las MTDs, derivado de la preparación de Autorizaciones Ambientales Integradas para diversas empresas del sector, previamente al inicio del proceso de toma de decisión, han

sido minuciosamente informados sobre las características técnicas de cada una de las mejoras técnicas seleccionadas.

Cabe señalar, que los criterios sobre los que se basará la elección del escenario preferido son lineales e independientes entre sí (ver Tabla 2) puesto que se admite la no interacción o influencia entre los criterios respecto de una propiedad dada. Dichos criterios han sido revisados y consensuados por el AD como los idóneos para la identificación del escenario más sostenible. La Figura 4 muestra la estructura del problema como un modelo de decisión jerárquica en el que se plasma la relación establecida entre dichos criterios.

**Figura 4. Árbol de jerarquía: modelo de decisión jerárquica**



Tal y como describe la Tabla 2, entre los criterios discriminatorios seleccionados existen algunos cuya naturaleza es cualitativa (mantenimiento, ruido, grado de conocimiento e implantación y consolidación). Para poder configurar la matriz de valoración de los escenarios, dichos criterios requieren ser analizados por el AD, el cual valorará las alternativas respecto a cada uno de estos criterios, en base a sus conocimientos y experiencia.

Para ello, se medirá la preferencia de los expertos respecto a las alternativas, para cada criterio, por comparación pareada, en base a la escala de comparación 1-9 propuesta por Saaty (1980).

Con los resultados obtenidos se configura la matriz de valoración tal y como describe Saaty (1980) en su metodología (recuadro en rojo en la Tabla 5). Cabe señalar, que dicha matriz parte de la combinación de datos cualitativos y cuantitativos. Estos han sido normalizados distributivamente ya que reflejan tal cual la preferencia del decisor, es decir, la preferencia es proporcional a los valores de las alternativas para estos criterios. De este modo las medidas de preferencia asociadas a cada criterio son comparables.

A continuación, para ponderar los criterios, de nuevo se realizan comparaciones pareadas, tal y como define Saaty (1980), para los diferentes criterios y sub-criterios. Para ello, consultando con los expertos se establece la correspondiente matriz de comparación pareada de los criterios de evaluación de primer nivel (C1-Criterio ambiental, C2-Criterio económico, C3-Criterio técnico y C4-Criterio social). Por otro lado, se completan las respectivas matrices de comparación para cada grupo de sub-criterios que integran a cada criterio de nivel superior, tal y como muestra la Figura 4 (una matriz comparando C21, C22 y C23; otra comparando C31 y C32; y otra para C41 y C42).

Cabe señalar, que como los expertos conforman un equipo que actúa como un todo, es decir, el AD, todas las puntuaciones individuales han sido agregadas mediante la utilización

de la media geométrica (Schrage, 1995; Guzzo et al., 1995; Aczel & Saaty, 1983; etc). Además, cabe resaltar que todas las matrices de juicios elaboradas hasta el momento por los expertos son consistentes (inconsistencia < 5 %) tanto de manera individual como una vez agregadas.

Las prioridades globales obtenidas para cada subcriterio se muestran en la Tabla 5, en la fila nombrada como "Prioridad global de sub-criterios".

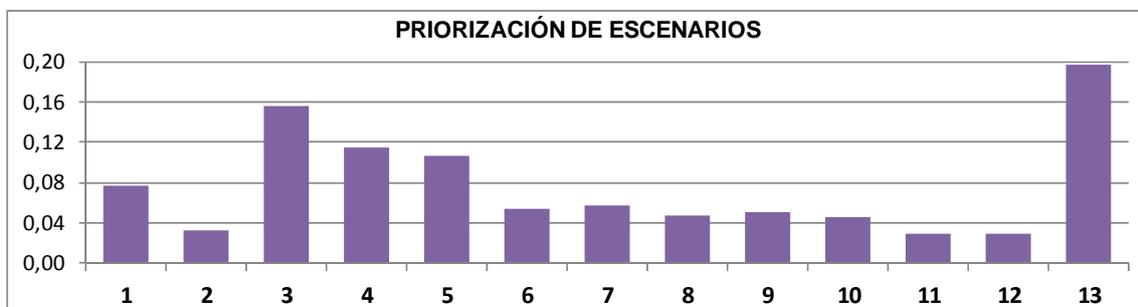
**Tabla 5. Matriz final de priorización de escenarios para la toma de decisión.**

		CRITERIOS								ORDEN FINAL:
		C1		C2		C3		C4		
		C11	C21	C22	C23	C31	C32	C41	C42	
Prioridad global de sub-criterios:		<b>0,064</b>	<b>0,080</b>	<b>0,340</b>	<b>0,171</b>	<b>0,040</b>	<b>0,190</b>	<b>0,047</b>	<b>0,068</b>	
ESCENARIOS ALTERNATIVOS	1	0,066	0,117	0,073	0,100	0,031	0,045	0,095	0,109	<b>0,077</b>
	2	0,067	0,015	0,037	-0,093	0,117	0,095	0,062	0,087	<b>0,034</b>
	3	0,065	0,137	0,147	0,232	0,031	0,203	0,098	0,115	<b>0,157</b>
	4	0,113	0,086	0,109	0,212	0,031	0,095	0,067	0,067	<b>0,114</b>
	5	0,115	0,086	0,094	0,196	0,031	0,095	0,067	0,067	<b>0,107</b>
	6	0,095	0,064	0,052	0,032	0,117	0,045	0,073	0,046	<b>0,054</b>
	7	0,068	0,050	0,061	0,058	0,031	0,045	0,077	0,082	<b>0,058</b>
	8	0,069	0,050	0,049	0,036	0,031	0,045	0,065	0,057	<b>0,048</b>
	9	0,068	0,050	0,055	0,029	0,031	0,045	0,077	0,082	<b>0,051</b>
	10	0,068	0,050	0,045	0,027	0,031	0,045	0,065	0,057	<b>0,045</b>
	11	0,068	0,026	0,042	-0,042	0,117	0,019	0,075	0,056	<b>0,029</b>
	12	0,069	0,026	0,042	-0,046	0,117	0,019	0,075	0,056	<b>0,029</b>
	13	0,069	0,243	0,194	0,259	0,287	0,203	0,105	0,119	<b>0,197</b>

Finalmente, se han obtenido las prioridades finales de los escenarios, las cuales forman el vector global de prioridades para el nivel más bajo de la jerarquía de la Figura 3. Dicho vector (última columna de la Tabla 6) se obtiene agregando de modo aditivo las prioridades individuales (sumas ponderada),

Para facilitar la interpretación de los resultados, el vector de prioridades obtenido en base a las preferencias del Agente Decisor se muestra en forma de gráfico de barras en la Figura 4.

**Figura 4. Priorización de escenarios en base a las preferencias del Agente Decisor**



Tal y como se observa en la representación gráfica de los resultados, los escenarios óptimos son, por orden de prioridad, el 13, el 3, el 4 y el 5.

## 6. Discusión y conclusiones

Comparando los resultados obtenidos mediante las dos metodologías de análisis de la sostenibilidad aplicadas podemos afirmar que los resultados obtenidos con los dos métodos presentados coinciden.

Cabe señalar que en el método de ponderación igualitaria, los resultados obtenidos pueden variar en función de la lectura que se haga de las gráficas, aunque presenta la ventaja de que permite identificar el comportamiento de las alternativas para cada uno de los indicadores analizados de forma individual.

El AHP es un método más sistemático y permite una mejor trazabilidad. Además, dicho método ofrece un orden de prioridad de las alternativas, por lo que si no pudiera aplicarse la opción preferida, conoceríamos exactamente cuál sería la siguiente mejor opción. Ahora bien, estos resultados son intransferibles puesto que al variar el Agente Decisor variará el resultado final, y por tanto no pueden ser utilizados de manera generalizada. Asimismo, la participación de dicho agente, generalmente formado por un conjunto de expertos con amplio conocimiento en la materia, hace que la aplicación del AHP sea más costosa y que la obtención de resultados pueda demorarse más en el tiempo.

Con respecto al caso de aplicación, se puede establecer que la aplicación de recuperadores de energía junto con técnicas o bien de reducción de ruido (escenario 13) o de mitigación de emisiones particuladas difusas (escenario 3) forman escenarios de combinación de MTDs totalmente recomendados para aumentar la sostenibilidad de las azulejeras españolas. Además, si se pretende reducir los contaminantes ácidos de las emisiones producidas, la combinación de la recuperación energética con técnicas de depuración por vía seca con  $\text{CaCO}_3$  y/o  $\text{Ca(OH)}_2$  conforman los escenarios de mejora más recomendables desde el punto de vista de la sostenibilidad (escenarios 4 y 5). Estos resultados son consistentes, puesto que se obtienen de la aplicación de las dos metodologías de decisión multicriterio aplicadas.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias a la financiación del Ministerio de Ciencia e Innovación (DPI2008-04926/DPI) y de la Generalitat Valenciana (ACOMP/2011/036).

## Referencias

- Aczel, J. y Saaty, T.L., 1983. Procedures for synthesizing ratio scale judgements. *Journal of Mathematical Psychology*, 27, pp.: 93-102.
- Afgan N.H., Carvalho M.G., 2004. Sustainability assessment of hydrogen energy systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 29, pp.:1327-1342.
- Afuah, A. 2000. How much do your “co-opetitors” capabilities matter in the face of technological change? *Strategic Management Journal*, 21, pp.: 387-404.
- Azzone, G., Manzini, R., 2008. Quick and dirty technology assessment: The case of an Italian Research Centre. *Technological Forecasting and Social Change*, 75 [8], pp.: 1324-1338.
- Bréchet, T., Tulkens, H., 2009. Beyond BAT: selecting optimal combinations of available techniques, with an example from the limestone industry. *Journal of Environmental Management* 90, pp.: 1790-1801.
- EC, 2006. IPPC Reference Document on Economics and Cross-media Effects. European Commission, DG JRC, Sevilla, Spain.

- EC, 2007. IPCC Reference Document on Best Available Techniques (BAT) in the Ceramic Manufacturing Industry. European Commission, Institute for Prospective Technological Studies, Sevilla, Spain.
- Directive 2010/75/EU of the European Parliament and the Council, of 15 January, concerning Industrial Emissions (DIE).
- Directive 2008/1/EC of the European Parliament and the Council, of 15 January, concerning integrated pollution prevention and control (IPPC).
- Directive 1996/61/EC of the European Parliament and the Council, of 24 September, concerning integrated pollution prevention and control.
- Liao, Z. and Cheung, M.T., 2002. Internet-based E-Banking and Consumer Attitudes: An Empirical Study. *Information and Management*, 39, pp.: 283-295.
- Goedkoop M., Spriensma, R., 2000. *The Ecoindicator'99: a Damage Oriented Method for Life Cycle Impact Assessment: Methodology Report*". Pré Consultants BV, Amersfoort: The Netherlands.
- Gómez-López, M.D., Bayo, J., García-Cascales, M.S., Angosto, J.M., 2009. Decision support in disinfection technologies for treated wastewater reuse. *Journal of Cleaner Production* 17, 1504-1511.
- Guzzo, R.A., Salas, E., 1995. *Team effectiveness and decision making in organizations*. Jossey-Bass Inc., San Francisco.
- Ibáñez-Forés, V., Bovea, M.D., Azapagic, A., 2013. Assessing the sustainability of Best Available Techniques (BAT): methodology and application in the ceramic tiles industry. *Journal of Cleaner Production*. (In press)
- Musango, J.K., Brent, A.C., 2011. A conceptual framework for energy technology sustainability assessment. *Energy for Sustainable Development*, 15 [1], pp.: 84-91.
- Pilavachi PA, Roumpeas CP, Minett S, Afgan NH., 2006. Multi-criteria evaluation for CHP system options. *Energy Conversion and Management* 47, 3519-3529.
- Pilavachi, P.A., Stephanidis, S.D., Pappas, V.A., Afgan, N.H., 2009. Multi-criteria evaluation of hydrogen and natural gas fuelled power plant technologies. *Applied Thermal Engineering* 29, 2228-2234.
- PRé Consultants, 2011. SIMAPRO v7.3.2. PRé Consultants, B.V. Amersfoort, The Netherlands.
- Saaty, T. L., 1980. *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, New York, USA.
- Sadiq, R., Khan, F.I., Veitch, B., 2005. Evaluating offshore technologies for produced water management using GreenPro-I - A risk-based life cycle analysis for green and clean process selection and design. *Computers and Chemical Engineering* 29 [5], 1023-1039
- Schollenberger, H., Treitz, M., Geldermann, J., 2008. Adapting the European approach of best available techniques: case studies from Chile and China. *Journal of Cleaner Production* 16 [17], 1856-1864.
- Schrage, M., 1995. *No more teams! Mastering the dynamics of creative collaboration*. Nueva York: Currency Doubleday.
- Tran T. A., Daim T., 2008. A taxonomic review of methods and tools applied in technology assessment. *Technological Forecasting & Social Change*, 75, pp.: 1396–1405.
- Wang, J.-J., Jing, Y.-Y., Zhang, C.-F., Shi, G.H., Zhang, X.-T., 2008. A fuzzy multi-criteria decision-making model for trigeneration system. *Energy Policy*. 36 [10], pp.: 3823-3832.