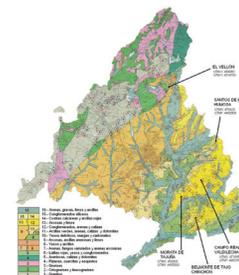


# Introducción de criterios de sostenibilidad en la elección de emplazamientos industriales mediante modelos multicriterio



## INTRODUCTION OF SUSTAINABILITY CRITERIA IN THE SELECTION OF INDUSTRIAL LOCATIONS THROUGH MULTICRITERIA MODELS

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5853> | Recibido: 28/05/2013 • Aceptado: 11/12/2013

Juan Pedro Luna-González<sup>1</sup>,  
 M<sup>a</sup> Encarnación Rodríguez-Hurtado<sup>2</sup>

<sup>1</sup> COMUNIDAD DE MADRID. Dirección General de Industria, Energía y Minas. Calle Cardenal Marcelo Spínola, 14 - 28016 Madrid. Tfno: +34 915 802177. [juan.luna@madrid.org](mailto:juan.luna@madrid.org)

<sup>2</sup> UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID. Departamento de Química Industrial y del Medio Ambiente. Calle José Gutiérrez Abascal 2, 28006 - Madrid. Tfno: +34 913 363188 [erodriguez@etsii.upm.es](mailto:erodriguez@etsii.upm.es)

### ABSTRACT

• The choice of locations for the implementation of industrial activities is a complex problem where the cost and efficiency criteria have been adding new ones relating to the environment impact and the company's corporate image reflected in Corporate Social Responsibility.

The environmental criteria have been getting big importance in the final decision, to become key elements in the final decision, due to the duty of submit of environmental assessment projects.

Therefore, promoters, quite often, ask previously to the Administration about the viability of their projects before starting a lengthy administrative procedure.

This paper proposes the use of sustainability indicators and their application through a multi-criteria decision model for managing the establishment options initially considered, so that they become an help instrument of estimation in order to making these decisions.

To show its usefulness we propose the use of the support tool for decision making based on the PROMETHEE methodology and its application in the management of 5 alternative sites for the installation of a cement factory in the Community of Madrid under sustainability criteria.

• **Keywords:** Industrial Establishment, indicators, sustainable development, localization, multicriteria.

### RESUMEN

La elección de localizaciones para la implantación de actividades industriales es un problema complejo, donde a los criterios de coste y eficiencia se han ido añadiendo otros nuevos relativos tanto al impacto en el medio ambiente como a la imagen de la empresa reflejada en la Responsabilidad Social Empresarial.

Los criterios medioambientales han ido adquiriendo gran relevancia en la decisión final, hasta convertirse, gracias a la obligación de someter los proyectos a evaluación ambiental, en elementos clave en la decisión final.

Por ello, resulta relativamente frecuente que los promotores consulten previamente con la Administración sobre la viabilidad de sus proyectos antes de iniciar un dilatado procedimiento administrativo.

En este trabajo se plantea la utilización de indicadores de sostenibilidad y su aplicación, a través de un modelo de decisiones multicriterio, para la ordenación de las distintas opciones de ubicación inicialmente consideradas, de tal forma que se conviertan en instrumento de tanteo y ayuda en la toma de estas decisiones. Para mostrar su utilidad se propone la utilización de la herramienta de apoyo basada en la metodología PROMETHEE y su aplicación en la ordenación de cinco emplazamientos alternativos para la instalación de una cementera en la Comunidad de Madrid según criterios de sostenibilidad.

**Palabras clave:** Establecimiento Industrial, indicadores, desarrollo sostenible, localización, multicriterio.

### 1. INTRODUCCIÓN

La toma de decisiones estratégicas en una empresa, como la implantación o ampliación de instalaciones industriales, ha sido tradicionalmente una cuestión compleja y vinculada a diversos factores entre los que destacan el coste y la eficiencia.

Las primeras teorías que abordaron el problema de la localización industrial, en base a estos dos objetivos, se originaron durante el siglo XIX y principios del XX. La evolución de las distintas metodologías en este campo han ido orientadas desde los inicios a la búsqueda de la minimización de costes tanto los correspondientes al transporte de materias primas como los relativos al resto de factores productivos (capital y trabajo) y los ligados a la comercialización de sus productos [1] [2].

Entre estos trabajos cabe destacar el modelo conocido como "Teoría de los Lugares Centrales", propuesto inicialmente por Christaller en 1933 y completado, posteriormente, por Lösch

en 1954 y Ghosh en 1986. En este modelo la localización empresarial, en general, se realizaría en el denominado lugar central para abastecer a la mayor población posible distribuida por todo el territorio circundante [3].

Actualmente, la decisión sobre localización de nuevos establecimientos industriales sigue siendo una problema estratégico para las empresas al no existir una solución universal sino múltiples, dependiendo del punto de vista de la disciplina desde donde se planteen (matemática, geográfica, económica, sociológica, psicológica, ingenieril).

A la complejidad inherente a la elección del emplazamiento más adecuado también se ha unido una mayor sensibilización ambiental que, en los últimos treinta años, ha propiciado importantes transformaciones en los planteamientos empresariales al establecer una conexión entre su objetivo de rendimiento económico y la protección del medio ambiente. La evolución de este nuevo planteamiento ha dado lugar a un nuevo enfoque donde el objetivo de generar valor se plantea en reconciliación con otros objetivos económicos, sociales y medioambientales en la llamada *Responsabilidad Social Empresarial* (RSE) [4].

En este cambio de enfoque, la sensibilidad hacia el entorno se ha visto reforzado por otros criterios de oportunidad sociopolítica, a los que se ha unido una estricta legislación enfocada a la minimización de impactos ambientales.

Esta legislación se basa en los Estudios de Impacto Ambiental como instrumento para garantizar la preservación del medioambiente de manera que las Administraciones Públicas se pronuncian sobre la idoneidad de la implantación de determinadas instalaciones industriales a través de la Declaración de Impacto Ambiental. Este procedimiento está regulado en España mediante Ley 21/2013, de 9 de diciembre [5] y las comunidades autónomas, a su vez, cuentan en la mayoría de los casos con su desarrollo específico.

No obstante, a pesar de tratarse de un procedimiento reglado, en la elaboración de los Estudios de Impacto Ambiental, existe cierto grado de libertad que ha permitido que, a lo largo del tiempo, se hayan desarrollado numerosas metodologías, influenciadas en su mayoría por proyectos específicos. Sin embargo, ninguna de ellas se considera óptima para satisfacer las necesidades de todo tipo de proyectos y actuaciones [6].

Además, en el caso de determinadas instalaciones, entre las que se incluyen algunas actividades industriales muy contaminantes, existe la necesidad de llevar a cabo una efectiva prevención y un control integrado de la contaminación, lo que añade un requisito adicional para su construcción, montaje, modificación sustancial, explotación o traslado. En la Unión Europea este requisito se conoce como Autorización Ambiental Integrada. A estos efectos, en todos los Estados Miembro se ha desarrollado un importante cuerpo legislativo en consonancia con la Directiva 96/61/CE, del Consejo, de 24 de septiembre [7], que en España se ha traspuesto mediante la Ley 16/2002, de 1 de julio<sup>1</sup> [8].

En cualquier caso, tanto si es necesaria una Declaración

de Impacto Ambiental, como si se necesita una Autorización Ambiental Integrada, en un buen número de ocasiones se precisa someter la decisión de emplazamiento a un proceso que puede resultar heterogéneo, complejo y dilatado en el tiempo (varios años) teniendo que añadir además la incertidumbre del resultado.

No obstante, ante la gran incógnita sobre la viabilidad de la localización de una nueva instalación industrial entre varias posibles, en numerosas ocasiones se consulta con las autoridades, la opinión sobre las diferentes alternativas, si bien cualquier valoración previa no está exenta de subjetividad si no se apoya en instrumentos objetivos.

En el trabajo presentado no se plantea una alternativa a los Estudios de Impacto Ambiental, ampliamente admitidos por su incuestionable eficacia, sino que se propone la introducción de otros instrumentos previos y complementarios que, sobre la base de la sostenibilidad, permitan obtener una primera valoración de las posibilidades de éxito de cada alternativa, a través de un número limitado de indicadores que reflejen los aspectos más relevantes de la actividad mediante el empleo de herramientas de ayuda a la toma de decisiones multicriterio.

Esta nueva vía de exploración y tanteo previo podrá resultar de gran utilidad tanto al promotor como a las autoridades, para disponer de una primera valoración sobre la idoneidad de las distintas opciones y además abre la posibilidad de combinarlas introduciendo aspectos de carácter económico y social adicionales a los ambientales de gran interés para el desarrollo de políticas públicas de equilibrio territorial.

## 2. HERRAMIENTAS DE APOYO A LA TOMA DE DECISIONES

La necesidad de optimizar la elección entre distintas opciones ha contribuido a la búsqueda de metodologías de apoyo a la toma de decisiones complejas en escenarios donde se combinan múltiples, e incluso contradictorios, criterios de selección. En las últimas décadas se han desarrollado un gran número de métodos para la toma de decisión multicriterio que resultan de gran interés por su aplicación práctica en muchos campos [9].

Uno de los campos de aplicación es la elección del emplazamiento más sostenible para una actividad, donde los criterios de sostenibilidad estén representados por indicadores de caracterización territorial mientras que, la existencia de indicadores de comportamiento de la actividad va a tener su importancia cualitativa al establecer las preferencias o pesos a asignar sobre los indicadores territoriales asociados a ellos.

Se trata pues de un problema con un número discreto de criterios y alternativas (problema decisorio discreto) para cuya solución existen varias metodologías muy conocidas y utilizadas como el método ELECTRE (*Elimination and (et) Choice Translating Algorithm*) [10] o el método PROMETHEE (*Preferente Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations*) [11], pertenecientes, ambos, al grupo de métodos de relaciones de superación (*Outranking*), y el Proceso Analítico Jerarquizado AHP (*Analytic Hierarchy Process*) [12], cuya aplicación se ha simplificado gracias a su implementación informática.

<sup>1</sup> Modificada por Ley 5/2013, de 11 de junio (BOE n°140, de 12/06/2013)

En el estudio que se presenta en esta publicación se ha optado por el método PROMETHEE, que proporciona, mediante comparaciones binarias, una ordenación de las alternativas desde la mejor hasta la más débil, con la ventaja, frente al resto de sus competidores de poder establecer, no sólo preferencias entre criterios a través de los pesos asignados, sino también intracriterios a través de las funciones de preferencia, que permiten fijar para cada criterio la escala con la que el decisor puede establecer su variación respecto a valores umbrales (umbral de indiferencia, de preferencia estricta o de relación entre ambos) [13].

En la metodología PROMETHEE se establece no sólo la preferencia de una alternativa sobre otra, sino el grado o intensidad con que es preferida dicha alternativa, lo que da lugar a la consideración de flujos de superación. Estos flujos para cada opción serán positivos ( $\Phi^+$ ) cuando representen la intensidad de su preferencia respecto a las  $n-1$  alternativas restantes (fortaleza de la opción) y serán negativos ( $\Phi^-$ ) cuando representen la intensidad con la que otras opciones son preferidas a ella (debilidad de la opción), dando lugar a la ordenación de alternativas según los flujos de preferencia.

Para resolver el ordenamiento se dispone de dos técnicas, PROMETHEE I, que proporciona una ordenación parcial y

PROMETHEE II para obtener una ordenación completa, ambas implementadas en el software *Visual PROMETHEE* (Fig. 1) disponible en <http://www.promethee-gaia.net/software.html>, que incorpora el proceso GAIA consistente en un módulo de interacción visual complementario de esta metodología.

### 3. METODOLOGÍA Y PLANTEAMIENTO

#### 3.1. METODOLOGÍA

La evaluación de la sostenibilidad es un problema complejo, ya que, al no existir una forma directa de medida, los indicadores se han convertido en los instrumentos más utilizados para su estimación.

Un análisis del enfoque dado a los indicadores utilizados en los distintos sistemas de gestión medioambiental (ISO 14000, EMAS<sup>2</sup>, etc.), sistemas de comportamiento medioambiental y de desarrollo sostenible (UNCDS<sup>3</sup>, OCDE<sup>4</sup>, Unión Europea, nacionales y regionales, etc.) y los de sostenibilidad empresarial (RSE, memorias de sostenibilidad, etc.) permiten identificar una importante coincidencia de aspectos abordados en todos ellos que puede resumirse en la Tabla 1.

Escenario1	Des. Materiales	línea eléctrica	tend. hídrica	NO3	Partículas	SO3	Dist. zona pr...	n Especies	Recep. Eco.	Sensib. Empleado
Unidad	km	km	coef. correl.	por uno	por uno	por uno	m	unit/km2	tasa	por uno
Cluster/Grupo	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
<b>Preferencias</b>										
Min/Max	min	min	max	max	max	max	max	min	max	max
Peso	1,39	1,39	1,12	0,68	0,68	0,41	3,19	4,51	0,30	0,58
F. de Preferencia	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual
Umbrales	absoluto	absoluto	absoluto	absoluto	absoluto	absoluto	absoluto	absoluto	absoluto	absoluto
- Q: Indiferencia	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
- P: Preferencia	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
- S: Gaussiano	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
<b>Estadísticas</b>										
Mínimo	10,123	0,00	-0,791	0,240	0,350	0,620	435,00	13,00	0,33	1,56
Máximo	19,305	15,00	-0,106	0,550	0,470	0,780	2100,00	37,00	17,48	2,21
Media	13,185	8,80	-0,270	0,426	0,386	0,734	887,80	19,40	5,84	1,87
Desv. est.	3,290	6,49	0,262	0,107	0,045	0,058	625,66	8,96	6,38	0,25
<b>Evaluaciones</b>										
El Yellón	19,305	15,00	-0,106	0,510	0,470	0,760	524,00	37,00	3,45	1,64
Santos de la Hu...	13,775	2,00	-0,791	0,240	0,350	0,620	435,00	13,00	0,33	1,56
Morata de Tajuña	10,983	0,00	-0,110	0,400	0,370	0,760	500,00	18,00	17,48	2,06
Campo Real-Vald...	11,741	12,00	-0,161	0,430	0,390	0,750	2100,00	15,00	7,50	1,86
Belmonte de Taj...	10,123	15,00	-0,180	0,550	0,350	0,780	880,00	14,00	0,43	2,21

Figura 1: Interface de la herramienta Visual PROMETHEE. Fuente: Elaboración propia

<sup>2</sup> Eco-Management and Audit Scheme

<sup>3</sup> United Nations Commission on Sustainable Development

<sup>4</sup> Organisation for Economic Co-operation and Development

Dimensión medioambiental	Dimensión económica	Dimensión social
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Demanda de recursos</li> <li>• Descargas contaminantes</li> <li>• Impactos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desempeño empresarial</li> <li>• Relación económica con el entorno</li> <li>• Ecoeficiencia</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Relación humana</li> <li>• Relación laboral</li> <li>• Relación social</li> </ul>

Tabla 1: Relación de aspectos sobre los que se agrupan los indicadores de sostenibilidad. Fuente: Elaboración propia

A partir de esta coincidencia de aspectos, se pueden abordar otros planteamientos en donde los indicadores se desarrollen bajo un nuevo modelo conceptual según se refieran al comportamiento empresarial independientemente del entorno en donde se desarrolla la actividad, la interrelación que se produce entre entorno y actividad o exclusivamente al entorno donde se producen los impactos (Fig. 2).

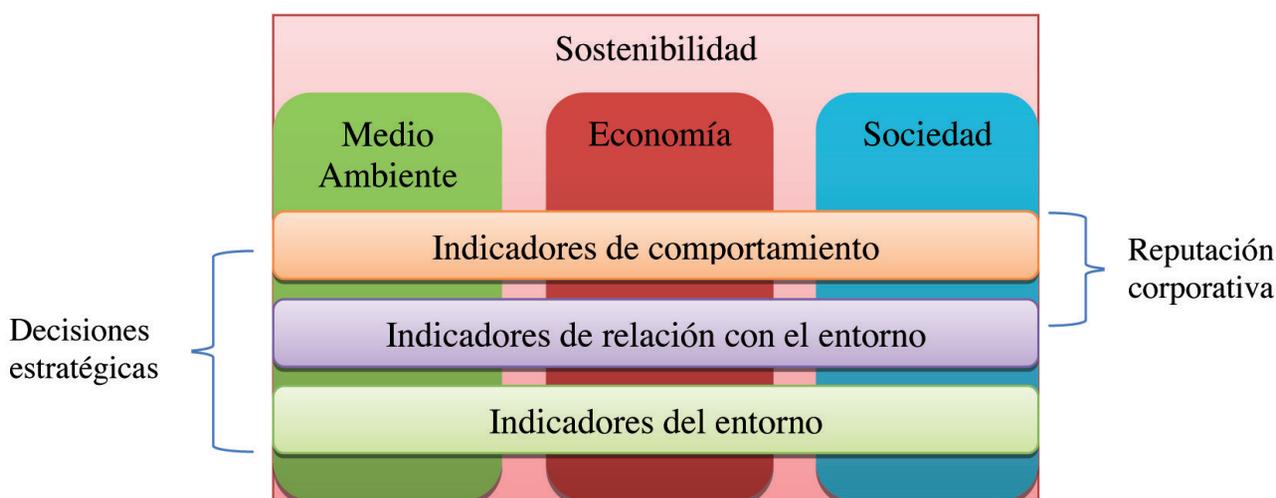


Figura 2: Estructura del modelo de indicadores para el análisis de emplazamientos según su función. Fuente: Elaboración propia

### 3.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El objetivo de este trabajo es evaluar mediante criterios de sostenibilidad la decisión de localizar una nueva cementera de características equivalentes a una de las líneas de fabricación de cemento gris con que cuenta *Cementos Portland Valderrivas* en la fábrica de El Alto en Morata de Tajuña en Madrid, en cinco emplazamientos diferentes de la *Comunidad de Madrid*.

La particularidad de este caso deriva de la combinación de una actividad como la cementera, generadora de importantes impactos ambientales y del interés económico de atender un mercado como el de la Comunidad de Madrid con grandes posibilidades de expansión urbanística y de infraestructuras, y con unas características territoriales muy singulares en el conjunto nacional (1,6% del territorio, 18,72% de la población

y el 17,9 del PIB<sup>5</sup>), a las que hay que sumar una gran protección territorial.

Para su solución se han considerado indicadores basados en RSE asociados a un proceso productivo equivalente y a las capacidades territoriales de los emplazamientos preseleccionados y éstos se han procesado con la herramienta de ordenación de opciones PROMETHEE.

#### 3.2.1. El proceso productivo

El proceso productivo para la fabricación del cemento comienza con la extracción, por métodos convencionales a cielo abierto de la caliza, y en menor medida arcilla que tras las etapas de homogeneización, mezcla en proporciones adecuadas y molido con un alto grado de finura, se calcina a 1.450°C para obtener *clinker*.

El *clinker*, una vez enfriado, es la materia base a la que se adicionan otras materias primas, como el yeso (para regular el fraguado) y otros compuestos para la obtención del cemento Portland. La utilización de otros materiales como caliza, cenizas volantes, puzolanas, etc. permite conseguir las distintas calidades requeridas según los usos del cemento (Fig. 3).

#### 3.2.2. Preselección de emplazamientos

Dado que la proximidad de materias primas para la fabricación del cemento es un factor clave de competitividad, por la importancia del transporte en los costes de producción, la litología de la Comunidad de Madrid, perfectamente conocida con importantes yacimientos de calizas, arcillas y yesos, va a condicionar la preselección de los 5 emplazamientos a comparar desde la perspectiva de la sostenibilidad (Fig. 4).

#### 3.2.3. Criterios de sostenibilidad

Los criterios de sostenibilidad pueden representarse por indicadores tanto de comportamiento como de situación terri-

<sup>5</sup> Producto Interior Bruto

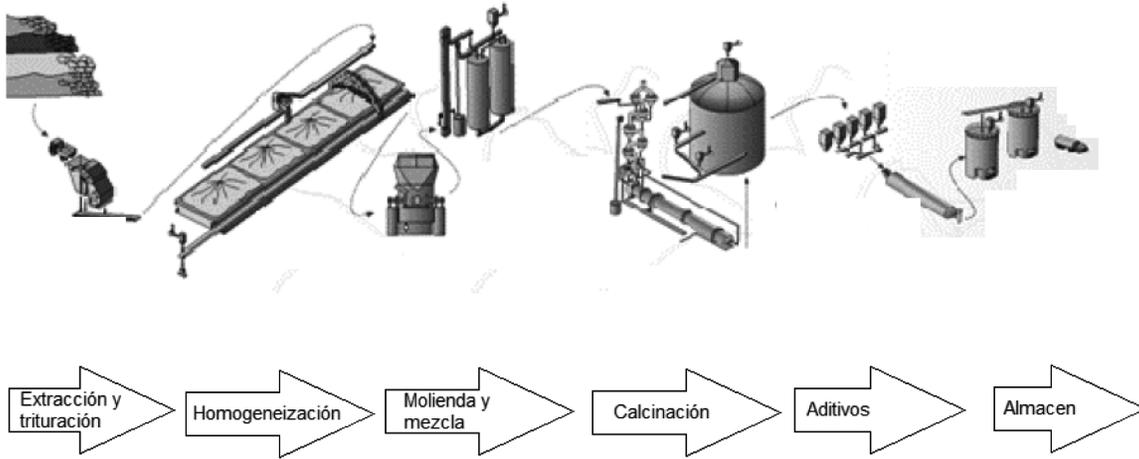


Figura 3: Esquema de producción de cemento.

Fuente: Elaboración propia a partir de Declaración Ambiental de Fabrica Cementos Portland "El Alto" [15]

torial. Los primeros no tendrán una aplicación directa en el problema, pero servirán para seleccionar y asignar la importancia de los segundos que constituyen los auténticos criterios para la comparación de opciones.

3.2.3.1. Evaluación del comportamiento

Los indicadores de comportamiento empresarial están ampliamente tratados en numerosas metodologías. Así, las *Declaraciones medioambientales* presentadas de acuerdo al Reglamento EMAS [17] proporcionan una importante información medioambiental de la actividad a evaluar, mientras que las *Memorias de sostenibilidad* publicadas siguiendo la metodología GRI [18] además de complementar estos aspectos ambientales proporcionan información social y económica de interés. Ambas metodologías, aplicadas por el Grupo Cementos Portland, han servido de base para determinar las magnitudes fundamentales de la actividad a evaluar, teniendo en cuenta su capacidad de producción respecto a la de la fábrica de El Alto (Tabla 2).

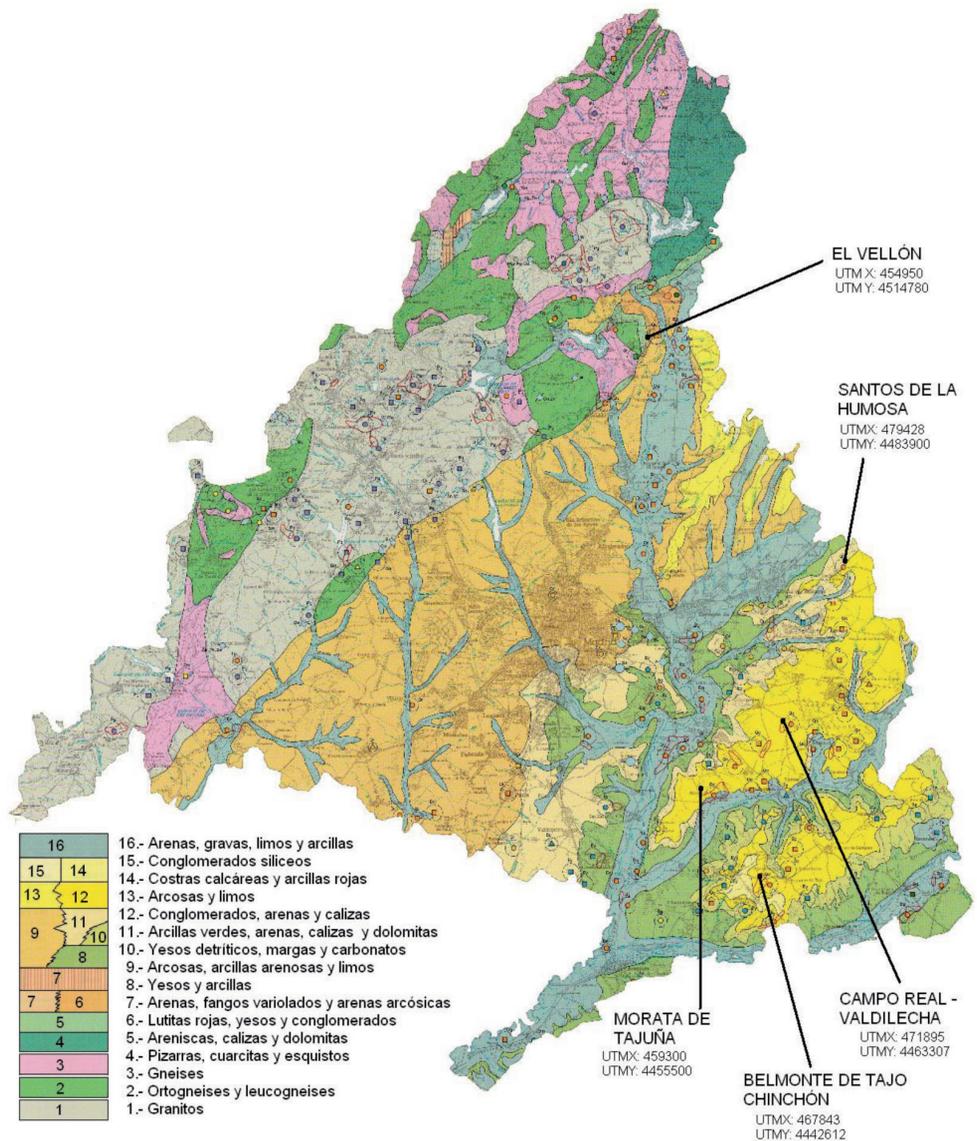


Figura 4: Litología de la Comunidad de Madrid y localización de emplazamientos para estudio de localización de cementera. Fuente: Elaboración propia sobre cartografía de rocas industriales del Instituto Geológico y Minero de España (IGME)

Aspecto	Indicador	Por línea	Unidades	Relevancia
Materiales	Caliza	642.887,5	t	alta
	Arcilla	64.518,5		
	Yeso	18.280		
Energía	Coque de petróleo	33.538,9	t	alta dentro del conjunto de materiales
	Electricidad (MWh)	45141,7	MWh	alta
Agua	Captación	78.747	m <sup>3</sup>	alta
	Reciclada	23957,2		
Emisiones	NO <sub>x</sub>	616.879,5	kg	alta
	SO <sub>2</sub>	5.589		moderada
	Partículas	16.353,5		alta
VEG <sup>1</sup>	Ingresos	49,38	M€	alta
VED <sup>2</sup>	Costes operativos	29,90		alta
	Salarios y beneficios sociales para los empleados	10,06		
Empleo	Nº de empleados	61	Empleos	alta

Tabla 2: Resumen de las principales magnitudes asignables a una línea de cemento gris. Fuente: Estimación a partir de Declaración Ambiental fábrica Cementos Portland "El Alto" y Memoria de Sostenibilidad del año 2011[15 y16].

El análisis de los indicadores de comportamiento permite realizar la selección de aspectos que van a tener una mayor importancia en la relación entre actividad y territorio, tal como se indica en la Tabla 2. Así, a la relevancia del transporte de materiales, por su impacto en los costes, se añaden otros desde la sostenibilidad como los que resultan de la gran demanda de energía eléctrica que exige el tendido de líneas eléctricas o la demanda de agua que tiene su efecto en el comportamiento del acuífero del que se alimenta mientras que, las emisiones atmosféricas influirán en los niveles de inmisión de los distintos contaminantes presentes en la zona.

En el ámbito económico-social destaca el importante efecto beneficioso que puede provocar una actividad de esta naturaleza en términos de reparto de riqueza y creación de empleo.

A estos aspectos de apreciación directa hay que añadir la importancia que se viene prestando últimamente en las evaluaciones ambientales a la preservación de espacios naturales y especies protegidas ya que son responsables de numerosas Declaraciones de Impacto Ambiental desfavorables.

En la selección de criterios se han tenido en cuenta, únicamente, aquellos indicadores relativos a aspectos en los que el comportamiento de la actividad tiene relevancia

### 3.2.3.2. Evaluación territorial

Una vez seleccionados los aspectos sobre los que la actividad va a tener una mayor relevancia, se ha realizado la

selección de indicadores de caracterización del emplazamiento asociados a dichos aspectos.

- 1. Transporte medio del aprovisionamiento de materiales y combustibles:** relacionado con el indicador de mercancías transportadas por distancia recorrida muy frecuente en el transporte [19]. Se calcula como el cociente entre la suma para todas las operaciones de transporte, del producto de las cargas ( $M_i$ ) (t) transportadas por la distancia ( $d_i$ ) (km) recorrida y la totalidad de las cargas transportadas (1).

$$DMA = \frac{\sum_i M_i \times d_i}{\sum_i M_i} \quad (1)$$

- 2. Longitud del tendido eléctrico:** definido como la suma de las longitudes de las líneas eléctricas necesarias ( $d_k$ ) hasta enlazar con el nodo de red de distribución más cercano capaz de proporcionar la potencia necesaria (2).

$$RIE = \sum_{k=1}^n d_k \quad (2)$$

3. **Propensión hídrica local (PHL):** definido como la evolución del piezómetro, al menos durante los 10 últimos años, correspondiente al acuífero subterráneo más próximo. Se calcula como el coeficiente de correlación lineal de los niveles piezométricos (p) con el tiempo (t). Esto es, el cociente entre la covarianza de ambos valores y el producto de sus respectivas desviaciones típicas ( $s_p$  para los valores piezométricos y  $s_t$  para el tiempo) (3).

$$PHL = \frac{Cov(p,t)}{s_p s_t} \quad (3)$$

4. **Capacidad de acogida del territorio para cada contaminante (CA<sub>i</sub>):** obtenido como la diferencia entre el valor límite legal para el contaminante (VL<sub>i</sub>) y el valor medio, generalmente anual, que proporcionen las estadísticas oficiales (VM<sub>i</sub>) [14] (4).

$$CA_i = 1 - \frac{VM_i}{VL_i} \quad (4)$$

5. **Distancia a zonas protegidas:** obtenido como la mínima distancia a zona protegida (mdp) en línea recta. Tendrá signo negativo si las instalaciones son interiores a la zona protegida y positivo si es exterior (5).

$$mdp = \min \{d_i\} \quad (5)$$

6. **Densidad de especies protegidas:** establecido como el número de especies en peligro de extinción (PE), interés especial (IE), sensibles a la alteración de su hábitat (SH) y vulnerables (EV) (Fig. 5) en la zona de la instalación (6).

$$EP = PE + IE + SH + EV \quad (6)$$

Este indicador deriva del impacto conjunto que puede generar en el hábitat de muchas especies la actividad humana y se incluye por su fuerte influencia en la mayor parte de las evaluaciones de impacto.

7. **Receptividad económica local:** representado a través de la tasa de crecimiento real de PIB con signo negativo (TC). Se obtiene como la diferencia con la unidad del cociente entre los dos valores de PIB real correspondientes al período más reciente (PIB<sub>1</sub>) y el anterior (PIB<sub>0</sub>), expresada en porcentaje (7).

$$TC = \left(1 - \frac{PIB_1}{PIB_0}\right) \times 100 \quad (7)$$

8. **Sensibilidad local al empleo (SLE):** definido como la relación de la tasa local de paro local (TDL) y la

situación ideal del pleno empleo (TDPE) establecida por convenio en el 5% (8).

$$SLE = \frac{TDL}{TDPE} - 1 \quad (8)$$

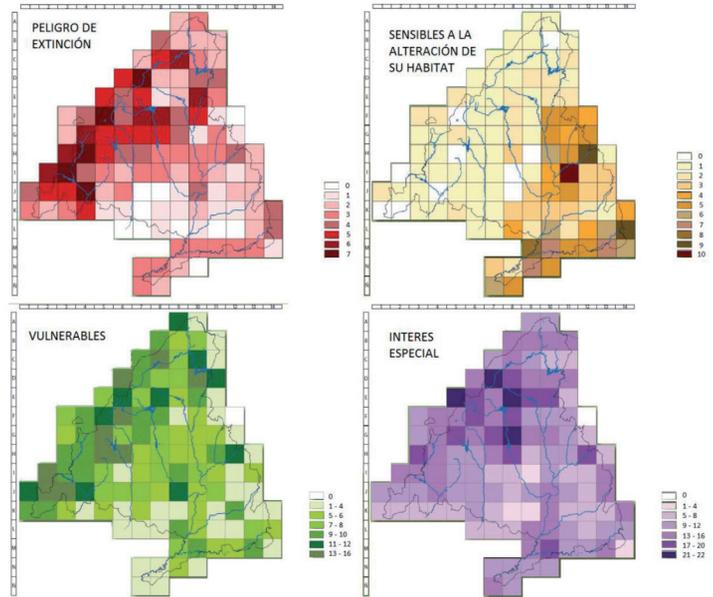


Figura 5: Distribución de especies de la categoría de peligro de extinción, sensibles a la alteración de su hábitat, vulnerables y de interés especial. Fuente: Atlas. El medio Ambiente en la Comunidad de Madrid [20]

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez elegidos los indicadores representativos, la elección de los pesos (W) es la etapa más delicada del método por su complejidad, especialmente al incrementar el número de criterios.

Para superar la dificultad que supone la asignación objetiva de pesos, resulta de gran utilidad el método AHP [12] en el que los pesos de los diferentes criterios los asigna el decisor, mediante el establecimiento de juicios de valor a través de la denominada “escala numérica de Saaty” (de 1 al 9) (Tabla 3).

Escala Numérica	Resultados de la comparación de criterios
1	Los dos criterios que se comparan tienen idéntica importancia
3	El criterio que se considera es moderadamente más importante que el otro
5	El criterio que se considera es bastante más importante que el otro
7	El criterio que se considera es mucho más importante que el otro
9	Un elemento tiene una importancia extremadamente alta frente al otro

Tabla 3: Escala de comparativa de parejas según el método de Saaty [12]

Criterios		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	W	Objetivo
Transporte de materiales y combustibles	(1)	1,00	1,00	3,00	3,00	3,00	5,00	0,33	0,20	3,00	1,00	1,39	Minimizar
Longitud del tendido eléctrico	(2)	1,00	1,00	3,00	3,00	3,00	5,00	0,33	0,20	3,00	1,00	1,39	Minimizar
Propensión hídrica local	(3)	0,33	0,33	1,00	3,00	3,00	5,00	0,20	0,20	5,00	3,00	1,12	Maximizar
(*) Capacidad de acogida para NO <sub>2</sub>	(4)	0,33	0,33	0,33	1,00	1,00	3,00	0,14	0,14	3,00	3,00	0,68	Maximizar
(*) Capacidad de acogida para partículas	(5)	0,33	0,33	0,33	1,00	1,00	3,00	0,14	0,14	3,00	3,00	0,68	Maximizar
(*) Capacidad de acogida para SO <sub>2</sub>	(6)	0,20	0,20	0,20	0,33	0,33	1,00	0,14	0,11	3,00	3,00	0,41	Maximizar
Distancia a zona protegida	(7)	3,00	3,00	5,00	7,00	7,00	7,00	1,00	0,33	7,00	3,00	3,19	Maximizar
Densidad de especies	(8)	5,00	5,00	5,00	7,00	7,00	9,00	3,00	1,00	7,00	3,00	4,51	Minimizar
Receptividad económica	(9)	0,33	0,33	0,20	0,33	0,33	0,33	0,14	0,14	1,00	0,33	0,30	Maximizar
Sensibilidad al desempleo	(10)	1,00	1,00	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	3,00	1,00	0,58	Maximizar

Tabla 4: Asignación de pesos según metodología Saaty. Fuente: Elaboración propia. (\*) Referidos al medio ambiente atmosférico

En este proceso, el decisor realiza reiteradamente, para cada criterio, una comparación subjetiva con el resto de criterios (dos criterios en cada comparación) asignado un valor de la escala numérica de Saaty según sus preferencias sobre los criterios que considera.

El resultado de esta comparación entre criterios es una matriz cuadrada, recíproca y positiva, denominada “matriz de comparaciones pareadas” (Tabla 4) en la que cada uno de sus componentes refleja la intensidad de preferencia de un criterio frente a otro. Por ejemplo, se ha establecido idéntica importancia (valor 1 en fila 1 columna 2) tras comparar los criterios “Transporte de materiales y combustibles (1)” y “Longitud del tendido eléctrico (2)”, pero se ha asignado

una importancia moderada (valor 3 en fila 1, columna 3) al comparar “Transporte de materiales y combustibles (1)” con “Propensión hídrica local (3)”.

Es importante considerar la relación entre el criterio y el objetivo para establecer la dirección de mejora de estos criterios. Así el objetivo para un criterio será de maximización cuando contribuya positivamente a la sostenibilidad y de minimización cuando su contribución sea negativa.

El cálculo de la media geométrica de los elementos de cada fila de la matriz de comparaciones pareadas permite obtener de forma sencilla el peso de cada criterio (W).

Asimismo la aplicación de los indicadores de evaluación territorial sobre distancia de aprovisionamiento, longitud

CRITERIOS	ALTERNATIVAS					
	El Vellón	Santos de la Humosa	Morata de Tajuña	Campo Real-Valdilecha	Belmonte de Tajo-Chinchón	
Transporte de materiales y combustibles (1)	19,305	13,775	10,983	11,741	10,123	
Longitud del tendido eléctrico (2)	15	2	0	12	15	
Propensión hídrica local (3)	-0,106	-0,791	-0,110	-0,161	-0,180	
Capacidad de acogida de emisiones atm.	NO <sub>2</sub> (4)	0,51	0,24	0,40	0,43	0,55
	partículas (5)	0,47	0,35	0,37	0,39	0,35
	SO <sub>2</sub> (6)	0,76	0,62	0,76	0,75	0,78
Distancia a zonas protegidas (7)	524	435	500	2.100	880	
Densidad de especies protegidas (8)	37	13	18	15	14	
Receptividad económica local (9)	3,35	0,33	17,48	7,50	0,43	
Sensibilidad local al empleo (10)	1,64	1,56	2,06	1,86	2,21	

Tabla 5: Matriz de preferencias para la elección de un emplazamiento para una cementera en la Comunidad de Madrid. Fuente: Elaboración propia

Orden	Alternativa	$\Phi$	$\Phi^-$	$\Phi^+$
1	Belmonte de Tajo - Chinchón	0,3261	0,6449	0,3188
2	Campo Real - Valdilecha	0,2439	0,6219	0,3781
3	Morata de Tajuña	-0,0598	0,4665	0,5263
4	Santos de la Humosa	-0,1600	0,4140	0,5740
5	El Vellón	-0,3502	0,3091	0,6593

Tabla 6: Ordenación de alternativas y flujos de superación de acuerdo a la metodología PROMETHEE. Fuente: Datos obtenidos aplicando la herramienta Visual PROMETHEE

del tendido eléctrico, calidad del aire, y otros aspectos ecológicos, económicos y sociales, todos calculados mediante las ecuaciones (1), (2), (3), (4), (5), (6), (7) y (8) para cada emplazamiento forma en conjunto la matriz de preferencias recogida en la Tabla 5.

Los valores de objetivos y pesos (Tabla 4) junto a los de la matriz de preferencia (Tabla 5) introducidos en la aplicación Visual PROMETHEE (Fig. 1) permiten obtener los flujos de preferencia ( $\Phi$ ). Los flujos de preferencia son positivos ( $\Phi^+$ ) o negativos ( $\Phi^-$ ), según se ha explicado en el apartado 2, y sobre ellos se establece la ordenación de opciones (Tabla 6).

Así bajo estos criterios y preferencias, las opciones de Belmonte de Tajo-Chinchón y Campo Real-Valdilecha son las más sostenibles y, por tanto, a considerar en estudios de mayor profundidad, mientras que las tres restantes con flujos de preferencia negativos serían las alternativas con menos posibilidades.

La metodología PROMETHEE es bastante robusta con respecto al valor umbral de la función de preferencia, pero en cambio, los resultados suelen tener una fuerte dependencia de los pesos asignados a los criterios, sobre todo cuando hay criterios muy contradictorios por lo que es necesario realizar un análisis de sensibilidad.

La aplicación Visual PROMETHEE dispone de varios instrumentos para este análisis de sensibilidad, siendo el más ilustrativo el que proporciona los intervalos de estabilidad que permiten establecer los valores entre los que puede variar un peso permaneciendo estables los demás de modo que, la ordenación final no varíe. Gráficamente resulta relevante comprobar el margen de variación del peso asignado a cada criterio para la que la ordenación permanece estable. El nivel de estabilidad representa el número de alternativas o emplazamientos

que mantienen el orden. Cuanto mayores son los intervalos de estabilidad (WSI) más robusta será la ordenación frente a los pesos asignados a cada criterio (Fig. 6).

En el caso planteado se obtienen unos intervalos de estabilidad amplios en la mayoría de los criterios, incluso en el caso más restrictivo que exigiría el mantenimiento de la ordenación de las 5 alternativas de emplazamientos (Tabla 7).

#### 4. CONCLUSIÓN

La introducción de indicadores de sostenibilidad en los modelos para la toma de decisiones multicriterio permite disponer de una importante herramienta de tanteo y valoración de alternativas en la elección de emplazamientos para el desarrollo de actividades industriales.

La aplicación de un modelo que clasifique, los indicadores según sean de comportamiento o relativos al territorio, tiene su utilidad ya que los indicadores de comportamientos van a ser de gran utilidad para la identificación de los indicadores territoriales más relevantes para la elección del emplazamiento.

Este procedimiento no se perfila como metodología alternativa a los Estudios de Impacto Ambiental que,

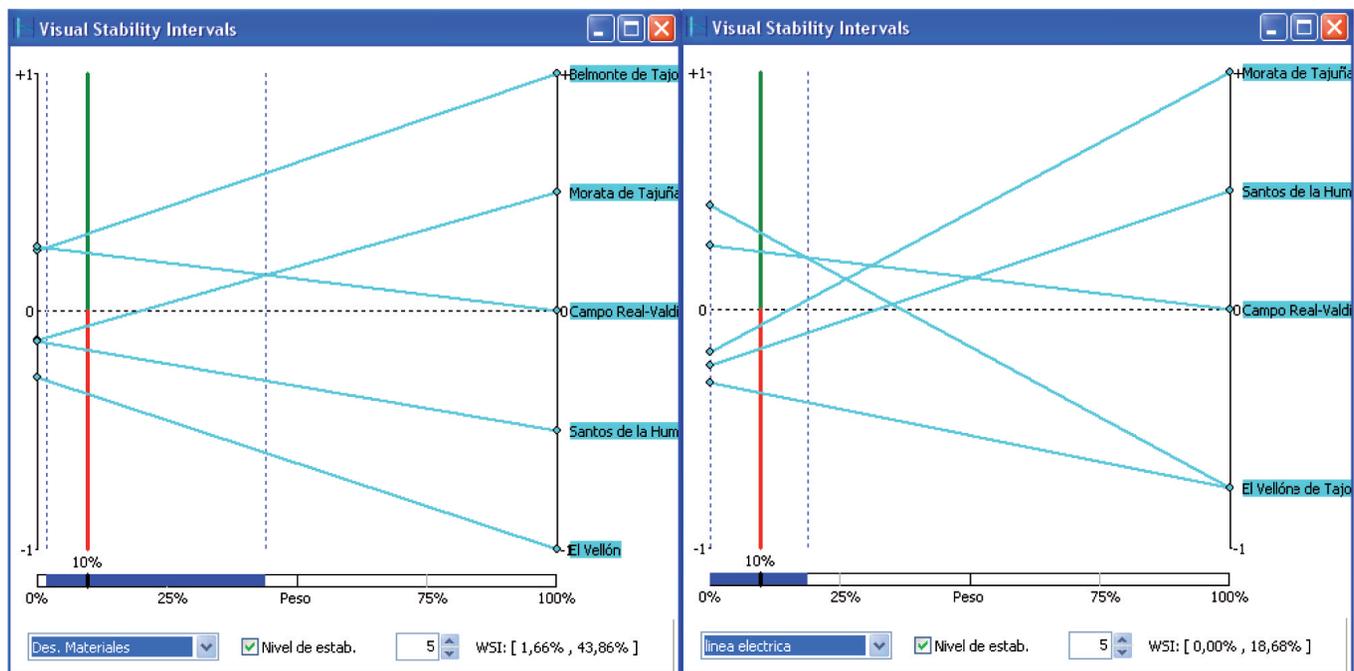


Figura 6: Intervalo de estabilidad para los criterios: Desplazamiento de materiales y combustibles (1). Longitud de tendido eléctrico (2). Fuente: Elaboración propia con Visual PROMETHEE

Criterio	Peso asignado (%)	Rango de estabilidad para el peso (%)		Amplitud
Transporte de materiales y combustibles (1)	10	1,66	43,86	42,2
Longitud del tendido eléctrico (2)	10	0	18,68	18,68
Propensión hídrica local (3)	8	1,27	15,86	14,59
Capacidad de acogida para NO <sub>2</sub> (4)	5	0	15,49	15,49
Capacidad de acogida para partículas (5)	5	0	10,65	10,65
Capacidad de acogida para SO <sub>2</sub> (6)	3	0	15,70	15,70
Distancia a zona protegida (7)	22	2,94	33,95	31,01
Densidad de especies (8)	32	24,47	35,33	10,86
Receptividad económica (9)	2	0	9,55	9,95
Sensibilidad al desempleo (10)	4	0	30,50	30,50

Tabla 7: Intervalos de estabilidad para los criterios manteniendo el orden de los 5 emplazamientos. Fuente: Datos obtenidos aplicando la herramienta Visual PROMETHEE

hoy por hoy, son la base para la obtención de permisos y autorizaciones, sino como una herramienta de tanteo, para valorar posibilidades de éxito de cada una de las alternativas previamente consideradas.

El empleo de metodologías para la toma de decisiones multicriterio proporciona un gran potencial de análisis, ya que además de obtener la ordenación cuantitativa de alternativas puede utilizarse para decidir sobre la mejor ubicación de una instalación, y puede llevar a cabo la simulación de diferentes resultados según varíen las preferencias o incluso los escenarios.

Al admitir multitud de criterios, resulta posible incorporar al modelo de sostenibilidad los criterios de coste y eficacia con lo que la empresa dispone de una valiosa valoración global. A su vez, la Administración puede disponer de un instrumento útil en el análisis de políticas de reequilibrio territorial.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Sepúlveda S. Gestión del desarrollo sostenible en territorios rurales: Metodología para la planificación. San José: IICA, 2008 – 419 p. ISBN13: 978-92-9039-872-1.
- [2] Gaviria-Ríos MA. Apuntes de economía regional, Pereira, 2010. Edición electrónica gratuita. Texto completo en [www.eumed.net/libros/2010f/873/](http://www.eumed.net/libros/2010f/873/)
- [3] Segrelles-Serrano JA, Gómez-López JD, Palazón-Fernando S. Geografía Humana: Fundamentos, Métodos y Conceptos. Alicante: Editorial Club Universitario, 2002. 273p. ISBN: 84-8454-181-9.
- [4] Elguero-Merino JM. "Responsabilidad Social Corporativa". Dyna Ingeniería e Industria. Marzo, 2007. Vol. 82 p. 26-28
- [5] España. Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental. Boletín Oficial del Estado nº 296 de 11 de diciembre de 2013. p. 98151- 98227.
- [6] Conesa V. Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental, 4ª Edición. Madrid: Mundi-Prensa Libros, 2009. 864 pp. ISBN: 978-84-8476-384-0
- [7] Unión Europea. Directiva 96/61/CE, del Consejo, de 24 de septiembre, relativa a la prevención y al control integrado de la contaminación. Diario Oficial L 257 de 10 de octubre de 1996, p. 26.
- [8] España. Ley 16/2002, de 1 de julio, de Prevención y Control Integrados de la Contaminación. Boletín Oficial del Estado,

- núm. 157 de 2 de julio de 2002, p 23910- 23927
- [9] Romero C. Análisis de las decisiones multicriterio. 1º ed. Madrid: Isdefe, 1996.115p. ISBN:84-89338-14-0
- [10] Benayoun R, Roy b, Sussman B. Une Methode pour Guider le Choix en Presence des points de Vue Multiples. Note de Travail n° 49. Paris : Direction Scientifique de la SEMA (Metra International), juin 1966
- [11] Brans JP. «L'ingénierie de la décision; Elaboration d'instruments d'aide à la décision. La méthode PROMETHEE». En Nadeau R, Landry M editores, «L'aide à la décision: Nature, Instruments et Perspectives d'Avenir», Québec, 1982. 183-213 p. Presses de l'Université Laval
- [12] Saaty TL. The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation. San Francisco: McGraw Hill, 1980. ISBN: 0-07-054371-2. 287 p.
- [13] Barberis, G. M. F. LOS MÉTODOS PROMETHEE: Una Metodología de Ayuda a la Toma de Decisiones Multicriterio Discretas. 2002, Disponible en: [http://www.uv.es/asepuma/recta/extraordinarios/Vol\\_01/01t.pdf](http://www.uv.es/asepuma/recta/extraordinarios/Vol_01/01t.pdf) [5/5/2013]
- [14] Luna-González JP, Rodríguez-Hurtado ME. "Ampliación de las posibilidades de uso de los indicadores de RSE". Dyna Ingeniería e Industria. Octubre, 2012. Vol. 87 p.558-565 DOI.: <http://dx.doi.org/10.6036/4586>
- [15] Grupo Cementos Portland Valderrivas. Declaración Medioambiental 2011 Fábrica El Alto. 72 pp. Disponible [2/05/2013] en: <http://www.valderrivas.es>
- [16] Grupo Cementos Portland Valderrivas. Memoria de Sostenibilidad 2011. 92 pp. Disponible [2/05/2013] en: <http://www.valderrivas.es>
- [17] Unión Europea. Reglamento (CE) No 1221/2009 del Parlamento Europeo y del Consejo de 25 de noviembre de 2009, relativo a la participación voluntaria de organizaciones en un sistema comunitario de gestión y auditoría medioambientales (EMAS), y por el que se derogan el Reglamento (CE) no 761/2001 y las Decisiones 2001/681/CE y 2006/193/CE de la Comisión. *Diario Oficial* L 342 de 22.12.2009 p.1-45
- [18] GRI. *Guía para la elaboración de Memorias de Sostenibilidad*. Amsterdam: Global Reporting Initiative, 2006
- [19] España. Los transportes, las infraestructuras y los servicios postales. Informe Anual 2009. Madrid: Centro de Publicaciones de la Secretaria General Técnica del Ministerio de Fomento, 2010. NIP0: 161-10-129-1. 348p.
- [20] Comunidad de Madrid. Atlas del Medio Ambiente en la Comunidad de Madrid. Madrid: Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. 2007. 83p.

(Footnotes)

- 1 Valor Económico Generado
- 2 Valor Económico Distribuido