

# **Método matemático para evaluar la sostenibilidad utilizando lógica borrosa**

*Caro Carretero, Raquel (rcaro@doi.icaei.upcomillas.es)*

*Dept. Organización Industrial  
Universidad Politécnica de Comillas*

*Salvador Alcaide, Adela (ma09@caminos.upm.es)*

*Dept. Matemática e Informática aplicadas a la Ingeniería Civil  
ETSI Caminos. Universidad Politécnica de Madrid*

*Alfonso Garmendia Salvador (algarsal@upvnet.upv.es)*

*Instituto Agroforestal Mediterráneo  
Universidad Politécnica de Valencia*

## **RESUMEN**

En este trabajo se pretende fijar algunas bases para la construcción de un modelo matemático que permita evaluar el grado de sostenibilidad de un proyecto (edificio, barrio, urbanización...). Los criterios de evaluación de proyectos apuestan con especial énfasis en los impactos sociales, ambientales y económicos en el desarrollo local, regional o nacional a través de la definición e identificación de indicadores de sostenibilidad evaluados mediante la lógica borrosa. La utilización de esta herramienta se justifica por el manejo de información incompleta, imprecisa e inconsistente.

***Palabras claves:***

Modelo matemático; sostenibilidad; lógica borrosa; indicadores.

## **ABSTRACT**

This paper intends to set some groundwork for building a mathematical model to assess the degree of sustainability of a project (building, neighborhood, development ...). The criteria for project evaluation bet with special emphasis on social, environmental and economic development in local, regional or national level through the definition and identification of sustainability indicators evaluated using fuzzy logic. The use of this tool is justified by the management of incomplete, inaccurate and inconsistent.

### ***Keywords***

Mathematical model; sustainability fuzzy logic; indicators.

## **1. INTRODUCCIÓN**

La formalización de un modelo que utilice la lógica borrosa y determine si un proyecto es, o hasta que punto es, sostenible es una innovadora aplicación de la lógica fuzzy.

Los indicadores de la sostenibilidad social, económica y medio ambiental en ocasiones vienen dados en magnitudes medibles totalmente objetivas (renta per capita, por ejemplo), pero en otras ocasiones, el gran número de variables, la falta de conocimiento, la inconsistencia, la información incompleta o imprecisa (contaminación del agua, por ejemplo), aconseja el uso de las técnicas de la lógica borrosa para ayudar a la decisión de si un proyecto dado es sostenible y si no lo es, cómo, corrigiendo qué impactos, se puede conseguir que lo sea.

Por tanto este trabajo tiene la finalidad de proponer un procedimiento sistemático de la evaluación de un proyecto a través de una metodología que recoge de manera adecuada dos aspectos: el desarrollo sostenible y la lógica borrosa.

## **2. DIMENSIONES PRINCIPALES DEL DESARROLLO SOSTENIBLE**

El desarrollo sostenible se define como “el desarrollo que cubre las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para cubrir sus propias necesidades”. El término “desarrollo sostenible” representa ese balance entre la satisfacción de las necesidades actuales y las futuras, ofreciendo alternativas de crecimiento tecnológico y social que reduzcan los riesgos que suponen las tendencias de crecimiento actual.

La idea de sostenibilidad se puede contemplar desde tres perspectivas: ambiental, social y económica [18]. Estos tres puntos de vista son básicamente coincidentes en su fin último, pero aportan visiones complementarias para conseguirlo, siendo en la confluencia y equilibrio entre ellos donde se alcanza el desarrollo sostenible. La sostenibilidad ambiental persigue un crecimiento que sea respetuoso con el medio ambiente (aunque dentro de medio ambiente se deben

considerar también los aspectos sociales y económicos, para que su evaluación no suponga una duplicidad no se deben considerar dentro de este apartado). Por otra parte, la sostenibilidad social se centra en las estrategias de justicia social en el mundo actual y con la vista puesta en las generaciones futuras. Por último, la sostenibilidad económica se ocupa de buscar un desarrollo económico más equilibrado y estable a largo plazo.

Es decir, la Economía pretende maximizar el bienestar humano dentro de las limitaciones del capital y las tecnologías existentes. La Ecología hace especial hincapié en preservar la integridad de los subsistemas ecológicos con el fin de asegurar la estabilidad del ecosistema mundial siendo sus unidades de cómputo físicas, no monetarias y, por último, la Sociología recalca que los agentes clave son los seres humanos, siendo su esquema de organización social fundamental para encontrar soluciones viables que permitan encontrar el desarrollo sostenible.

La interacción entre la sostenibilidad económica, ecológica y social supone plantearse la búsqueda de un equilibrio entre la eficiencia económica (asignación óptima), la equidad social (distribución óptima) y el respeto al medio ambiente.

Efectivamente, parece que ya hay un cierto consenso a nivel mundial de que la cuestión de la sostenibilidad empieza a ser una parte importante de la agenda política y estratégica de la gran mayoría de los países [14 y 15]. El Protocolo de Kyoto y la Cumbre de Bali, impulsados ambos por los informes científicos del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) atestiguan esta preocupación a nivel mundial. Preocupación que denota una inquietud aún mayor sobre el futuro de nuestro planeta y sobre el legado que vamos a dejar a nuestros hijos.

En este sentido debemos asumir el reto y la oportunidad de ofrecer un modelo de desarrollo sostenible que haga compatible una dinámica de crecimiento económico, junto con el aumento de bienestar social y la mejora del medio ambiente. Debe incorporarse la evaluación de los recursos naturales como parte del rendimiento económico. La explotación de los recursos naturales debe mantenerse en un nivel como mínimo constante, consiguiendo de esta forma alcanzar asimismo la sostenibilidad ambiental. Para poder considerar esto en el

ámbito económico es necesario desarrollar indicadores del grado de impacto en la naturaleza de la actividad productiva. De esta forma podrá evaluarse el rendimiento conjunto, sin considerar exclusivamente factores económicos que pueden llevar a situaciones no sostenibles ambiental o socialmente.

### **3. NUEVAS OPORTUNIDADES**

El concepto de sostenibilidad implica una nueva filosofía de la Economía porque introduce la compatibilidad medioambiental en la consideración del desarrollo económico. En este sentido, el modelo matemático ha de contribuir a consolidar definitivamente el modelo Ambiental, desarrollando un modelo transformador de la realidad y al servicio de todos los seres humanos y cuya finalidad sea estar comprometidos con la sostenibilidad global del planeta.

Este modelo pretende contribuir a la construcción de sociedades progresivamente más sostenibles, ofreciendo un modelo contrastado, que garantice el desarrollo sostenible de nuestras sociedades [5]. El objetivo es fijar los conceptos, herramientas y procesos lógicos que se requieren para la comprensión de los fenómenos económicos actuales generando comportamientos comprometidos y responsables. De este modo ser capaces de liderar proyectos que tengan en cuenta el desarrollo sostenible e identificar oportunidades de desarrollo empresarial, ligadas a acciones de carácter económico y medioambiental. Tener una visión global e integrada de la problemática ambiental, los principales conceptos, criterios y distintas visiones de sostenibilidad, conocimiento de técnicas y de experiencias innovadoras de gestión ambiental.

Se plantea el estudio de criterios de evaluación de proyectos, con especial énfasis los impactos sociales y económicos de los proyectos en el desarrollo local, regional o nacional, haciendo especial énfasis en los impactos ambientales en su relación con objetivos generales de sostenibilidad.

## 4. EVALUACIÓN DE PROYECTOS

Un proyecto surge como respuesta a una idea que busca la solución de un problema o la forma para aprovechar una oportunidad de negocios. Múltiples factores influyen en el éxito o fracaso de un proyecto. En general, podemos señalar que si el bien o servicio producido es rechazado por la comunidad, esto significa que la asignación de recursos adoleció de defectos de diagnósticos o de análisis, que lo hicieron inadecuado para las expectativas de satisfacción de las necesidades del conglomerado humano. Debido a esto, es indispensable evaluar un proyecto para poder decidir sobre la conveniencia de llevarlo a cabo. La evaluación social de proyectos persigue medir la verdadera contribución de los proyectos al crecimiento económico del país.

Tradicionalmente los estudios y evaluación de proyectos se realizan solo desde el punto de vista económico, sin embargo, esto en la actualidad ya no es suficiente, resulta de vital importancia también evaluar en qué medida el proyecto en cuestión, además de reportar un crecimiento económico, es capaz de representar un impacto social favorable y de no impactar de manera agresiva o desfavorable sobre los recursos del medio ambiente que emplea, lo que en otras palabras se resume a: evaluar si el *proyecto es sostenible*. Estas evaluaciones deben ser analizadas tanto en sus recursos naturales como suelo, flora y fauna, como de contaminación del aire, agua, suelo, residuos y ruido, de valor paisajístico, de alteración de las costumbres humanas, de impacto sobre la salud de las personas..., además de su aspecto económico. Constituyen instrumentos preventivos de gestión que permiten que las políticas sostenibles puedan ser cumplidas y se incorporen tempranamente en el proceso de desarrollo y toma de decisiones.

Son muchas las metodologías que se utilizan. Nosotros pretendemos realizar una simbiosis entre la metodología propuesta en [10] y las técnicas de manejo de la información borrosa ya que gran parte de los conceptos y de la información que se utilizan son difusos por su carácter impreciso. Los juicios de valor, especialmente con variables lingüísticas, son un claro ejemplo de

información inconsistente. Por ejemplo, “la calidad del agua es buena” tiene diferentes interpretaciones según el interlocutor y con diferentes significados.

Se considera un impacto ambiental como la alteración, modificación o cambio de la calidad del medio ambiente producida por una actividad humana. Podemos considerar las siguientes definiciones incluidas en [10]:

*“Efecto ambiental notable: es aquel que es significativo y al que se considera un **impacto ambiental**. Es aquel que se manifiesta como una modificación del medio ambiente, de los recursos naturales, o de sus procesos fundamentales de funcionamiento...”*.

*“Efecto ambiental mínimo (despreciable) es aquel que puede demostrarse que no es notable”*.

Esta clasificación es subjetiva y el conocimiento puede ser incompleto. Por tanto, los problemas de escala y de incertidumbre van a estar presentes a la hora de determinar los efectos y los impactos ambientales que se producen debidos a una actividad concreta, sobre todo en el caso de los secundarios o los que se manifiestan a medio o largo plazo. Un impacto ambiental viene identificado por la consecuencia entre una acción de una actividad sobre un factor ambiental y ambos elementos, acción y factor, deben quedar explícitos en la definición que se haga de él. Por tanto la caracterización de los impactos consiste en describir los efectos identificados y considerados significativos o notables.

En este trabajo se trata de llevar a cabo una evaluación de impacto social, económico y medio ambiental es decir, identificar, predecir, valorar, prevenir o corregir y comunicar los efectos y los impactos producidos por una obra, discriminando entre las distintas alternativas, entre ellas la no realización de la obra. La selección de los factores sociales, económicos y ambientales y de las acciones de la obra conducen a identificar los posibles impactos y para evaluar estos se cuenta con una serie de indicadores.

En el proceso de un estudio de impacto se pueden distinguir cuatro bloques de procesos bien diferenciados: identificación, valoración, prevención y comunicación.

El proceso de identificación de impactos partirá de una lista de factores ambientales con una asignación de pesos para cada factor prefijada. Cada tipo de obra consta de una lista de acciones, (las usuales para ese tipo de obra). Cada impacto y cada efecto ambiental viene dado por un factor impactado y por una acción impactante.

La metodología puede resumirse en los siguientes pasos [3, 4, 7 y 9]:

- Describir el medio mediante un conjunto de factores ambientales afectados por el proyecto.
- Describir el proyecto mediante un conjunto de acciones o actividades.
- Identificar los efectos que cada acción definida tiene sobre cada factor ambiental identificado.
- Discriminar entre efectos mínimos e impactos.
- Los efectos mínimos ya no se valoran, mientras se deben valorar los impactos. Los efectos notables o impactos se clasifican a su vez en compatibles, moderados, severos y críticos.

Se podrían considerar las siguientes definiciones incluidas en [10]:

*“Impacto ambiental **compatible**: aquel cuya recuperación es inmediata tras el cese de la actividad, y no precisa prácticas protectoras o correctoras”.*

*“Impacto ambiental **moderado**: aquel cuya recuperación no precisa prácticas protectoras o correctoras intensivas, y en el que la consecución de las condiciones ambientales iniciales requiere cierto tiempo”.*

*“Impacto ambiental **severo**: aquel en el que la recuperación de las condiciones del medio exige la adecuación de medidas protectoras o correctoras, y en el que, aun con esas medidas, aquella recuperación precisa un periodo de tiempo dilatado”.*

*“Impacto ambiental **crítico**: aquel cuya magnitud es superior al umbral aceptable. Con él se produce una pérdida permanente de la calidad de las*



*condiciones ambientales, sin posible recuperación, incluso con la adopción de medidas protectoras o correctoras”.*

- En el siguiente paso, la valoración de los impactos. La valoración puede ser cualitativa o cuantitativa.

En la valoración cualitativa se evalúan, de forma subjetiva, una serie de cualidades de los impactos ambientales. Normalmente se utilizan las definidas por la legislación. Se obtiene un valor numérico que usualmente se denomina **importancia**.

Esta valoración cualitativa se realiza mediante una descripción lingüística de sus propiedades, tales como baja, media... para obtener un conocimiento cualitativo del impacto. Los pasos son:

- Caracterizar cada impacto mediante la estimación de su importancia.
- Calcular la importancia global del proyecto sobre el medio, usando las importancias obtenidas en el paso anterior.

En la valoración cuantitativa se mide la magnitud del impacto para lo que se utilizan indicadores numéricos y objetivos que proporcionan una medida de la magnitud del impacto, que en un primer momento se obtiene en unidades heterogéneas, y que mediante las funciones de transformación se convierte en la magnitud en unidades homogéneas o comparables entre distintos tipos de impactos, lo que permite obtener una valoración numérica del impacto total producido por la obra, el proyecto o la alternativa, de forma que se puede comparar el impacto total de las diferentes alternativas, permitiendo seleccionar la que menor impacto negativo produzca. Es importante no sólo establecer la magnitud sino también el umbral a partir del cual el impacto provocado debe imponer limitaciones a la actividad, bien en la fase de construcción como en la fase de explotación.

- Definir los indicadores.

- Caracterizar cada impacto mediante la valoración de su magnitud, primero en unidades heterogéneas, y mediante las funciones de transformación, en unidades homogéneas.
- Calcular la magnitud global del proyecto sobre el medio, usando las magnitudes (en unidades homogéneas) obtenidas en el paso anterior.

El análisis de los indicadores, prefijar cuáles son los que mejor miden cada impacto y las consecuencias ecológicas, sociales y económicas de determinados valores del indicador, valores umbrales, es uno de los objetivos a la hora de evaluar proyectos.

## **5. IDENTIFICACIÓN DE INDICADORES EN LA EVALUACIÓN DE PROYECTOS**

Sostenibilidad es un término cada vez más presente en la sociedad y su extenso uso es, en demasiadas ocasiones, equívoco o incluso inexacto. Su abuso hace que el concepto se vacíe de significado práctico. La tendencia general es identificar sostenible con ecológico o reciclado, cuando el alcance de sostenibilidad es considerablemente mayor. La sostenibilidad es mucho más que la utilización de energías renovables y de materiales reciclables, implica un compromiso de equilibrio social y desarrollo humano. Se define como un proyecto sostenible como aquel que optimiza los recursos y materiales, disminuye el consumo energético, los residuos, las emisiones, fomenta las energías renovables y aumenta la calidad de vida.

Los indicadores se pueden definir como medidas en el tiempo de las variables de un sistema que nos dan información sobre las tendencias de éste, sobre aspectos concretos que nos interesa analizar. Éstos pueden estar compuestos simplemente por una variable (número de vehículos de un municipio) o por un grupo de ellas, (como por ejemplo los metros cuadrados de verde urbano por habitante) y también pueden encontrarse interrelacionadas formando índices complejos, como los índices económicos.

Un *indicador* es un signo, típicamente medible, que puede reflejar una característica cuantitativa o cualitativa, y que es importante para hacer juicios sobre condiciones del sistema actual, pasado o hacia el futuro. La formación de un juicio o decisión se facilita comparando las condiciones existentes con un estándar o meta. Los indicadores son un medio de simplificar una realidad compleja centrándose en ciertos aspectos relevantes, de manera que quede reducida a un número manejable de parámetros.

En la gestión ambiental se utilizan para tres propósitos: a) suministrar información sintética para poder evaluar las dimensiones de los problemas; b) establecer objetivos; y c) controlar el cumplimiento de los objetivos.

Para la realización de la evaluación económica se determina emplear los criterios e indicadores clásicos que se utilizan en la *evaluación económico-financiera* desde el punto de vista privado, es decir, el Valor Actual Neto, la Tasa Interna de Retorno, la Rentabilidad del VAN, el Período de Recuperación Descontado, el Punto de Equilibrio de la Inversión. Para el caso de la evaluación del riesgo se realizarán análisis de sensibilidad. A fin de evaluar los efectos del financiamiento se realizará una evaluación financiera desde el punto de vista del inversionista [1, 6 y 8].

Al igual que los indicadores económicos, los indicadores sociales, por si solos no miden la sostenibilidad del municipio, lo hacen en conjunto con el resto de indicadores de un sistema. Estos indicadores son utilizados para evaluar el nivel de bienestar de una sociedad. El acceso a la sanidad pública, el derecho a la cultura, la exigencia de cubrir las necesidades básicas de la población y en general todos aquellos estándares que se relacionan con la calidad de vida, como parte integrante de un desarrollo plenamente sostenible.

Es decir, para la evaluación social se puede determinar el empleo del Producto Interior Bruto (PIB) y que considera el ingreso nacional y no la ganancia, es decir, permite visualizar cómo contribuye el proyecto al incremento de los beneficios del país o la región, midiendo la rentabilidad nacional a través de un índice agregado, el Valor Agregado Actualizado Neto (VAAN), que evalúa el impacto principal del proyecto en la economía, y otros criterios complementarios y cualitativos, tales como: el efecto en el empleo, en la distribución del ingreso

por regiones y por grupos sociales y su impacto en la balanza de pagos, aspectos que pueden asumir gran importancia socioeconómica. Los criterios cualitativos abarcan todas aquellas valoraciones de los efectos del proyecto que por su magnitud, carencia de información o sus particularidades no es sencillo que sean cuantificadas.

Para la evaluación de los impactos ambientales se propone el uso de indicadores, en los casos que sea posible, que cuantifiquen el efecto que ya ha sido determinado, a fin de hacer más explícito la magnitud que alcanza el mismo, y sobre esta base desarrollar las acciones pertinentes para evitar o contrarrestar el impacto, en caso que sea negativo, o aprovechar sus beneficios en el caso de un impacto positivo.

El primer paso de esta metodología consiste en la identificación de los procesos físicos, biológicos, socioeconómicos y culturales que pueden ser afectados por la acción propuesta. Es en este momento donde se llevan a cabo los Estudios de línea de base que dan cuenta del "estado del medio ambiente" antes de que se inicie un proyecto. El enfoque fundamental es el de unificar la información disponible, o generar la necesaria dentro de un área determinada, a fin de utilizarla para la fase siguiente de la evaluación de impactos: la predicción de impactos. Se trata de seleccionar entre los efectos identificados aquellos que efectivamente pueden ocurrir, y merecen una preocupación especial. Para ello se emplea una matriz de causa-efecto ponderada que se estructura en torno a los objetivos posibles del proyecto en las líneas horizontales, mientras en las columnas verticales figuran los distintos sectores del medio ambiente: tierra, agua, atmósfera, flora y fauna, del medio social y del medio económico, que pueden subdividirse a su vez en componentes o aspectos parciales de esos sectores. En la intersección queda una casilla donde se inscriben los grados en que el objetivo afecta al componente.

Se podrían utilizar los siguientes conceptos para la evaluación de la importancia:

Impacto:	Beneficioso (B),	Perjudicial (D).	
Certidumbre:	Cierto (C),	Probable (P).	
Magnitud:	Menor (1),	Medio (2),	Mayor (3).

Reversibilidad:	Temporal (T),	Permanente (P).	
Plazo:	Inmediato (I),	Mediano (M),	Largo (L).
Acción:	Sí (Y),	No (N).	

Existen un gran número de indicadores que permiten medir la calidad de las aguas [2], del aire, del ruido, de la flora y de la fauna. Muchos de ellos pueden tratarse mediante la lógica borrosa para determinar su importancia y su magnitud.

Se debe cuantificar los beneficios y costes ambientales, sociales y económicos ocasionados por la inversión, a partir de los planes de neutralización, mitigación y compensación de impactos, de restauración y manejo ambiental, así como los planes de seguimiento y monitorización que tienen los fines de proteger y conservar el medio ambiente, y cuyos costes y beneficios deben contemplarse como parte de la evaluación económica. La cuantificación de los beneficios y costes ambientales se podría realizar a través del método de los costes preventivos o defensivos.

Todas estas metodologías empleadas de una manera conjunta, permiten observar y analizar las diferentes aristas del proyecto, poniendo a relieve todos los beneficios y perjuicios que el mismo podría acarrear de forma directa e indirecta, y en este sentido determinar su sostenibilidad en el tiempo, o planificar nuevas alternativas más sostenibles.

### ***5.1. Objetivos del sistema de indicadores para la sostenibilidad***

- Permitir el seguimiento eficaz de la aplicación de Planes de Acción Ambiental.
- Evaluar la evolución económica, social y del medio ambiente respecto a las actuaciones que se llevan a cabo.
- Favorecer la obtención de información de una manera rápida y eficaz.
- Ofrecer información fácil y de una manera pedagógica a los ciudadanos.
- Determinar el grado de implicación de los agentes
- Ayudar en la toma de decisiones políticas respecto el medio ambiente.

- Obtener una visión totalizadora de los intereses predominantes en cada municipio.

## 5.2. *Indicadores básicos*

El estudio de los indicadores puede ser muy amplio. Según la *Carta de Aalborg* (aprobada en mayo de 1994 por las autoridades locales participantes en la *Conferencia europea sobre ciudades sostenibles* celebrada en Aalborg, Dinamarca) se analizan un total de 1.273 indicadores. La diversidad de indicadores, nombres y concreciones paramétricas forman un universo prácticamente inabarcable, en el que es difícil establecer correspondencias literales, que hagan visibles las regularidades existentes, por lo que hacer una lista reducida de los denominados indicadores básicos puede servirnos de ayuda.

Un indicador básico puede tener por tanto distintos indicadores específicos, por ejemplo el indicador *depuración* perteneciente a la categoría *agua* del área Medio Ambiente incluye: las condiciones de la red de depuración, los resultados de la depuración, control de vertido, la carga orgánica resultante en los ríos o la gestión de la depuración; pero que en cualquier caso persiguen el mismo objetivo, evaluar la progresión de la implantación de la depuración de las aguas residuales.

A continuación se describen los indicadores básicos asociados a economía, medio ambiente y sociales.

### **Categoría de Economía**

1. Accesibilidad económica
  - a. Renta
  - b. Accesibilidad a la vivienda
2. Producción
  - a. Diversificación económica
  - b. Vitalidad económica
  - c. Vitalidad turística
3. Sector privado
  - a. Certificado ambiental

4. Servicios públicos
  - a. Financiación del transporte público
5. Trabajo
  - a. Desempleo
  - b. Desempleo femenino

## **Indicadores de Economía**

### **Accesibilidad económica**

La *renta* mide la renta familiar o per cápita o la carga tributaria, y *accesibilidad a la vivienda* mide el esfuerzo que supone conseguir una vivienda en el municipio correspondiente.

### **Producción**

La *vitalidad del sector turístico* incluye tanto el turismo tradicional como el turismo ambiental. La *vitalidad económica*. La *diversificación económica* evalúa la diversidad existente utilizando el índice de Shannon.

### **Sector privado**

Evalúa los esfuerzos realizados desde las empresas para reconducir ambientalmente sus actividades mediante el *certificado de gestión ambiental*, que indica el número de empresas que han puesto en marcha algún control, homologado, de auditoría medioambiental.

### **Servicios públicos**

Se utiliza el indicador *financiación del transporte público*.

### **Trabajo**

Se analiza el desempleo, mediante con dos indicadores básicos: *tasa de desempleo* que mide tasas generales de la población, y *desempleo femenino*.

## **Categoría de medio ambiente**

Medio ambiente es el área temática más importante

6. Agricultura
  - a. Agricultura ambiental
  - b. Pesticidas y abonos sintéticos
7. Agua
  - a. Abastecimiento de agua

- b. Ahorro de agua
  - c. Consumo de agua
  - d. Depuración del agua
  - e. Ecología del agua
  - f. Agua como recurso
  - g. Reutilización del agua
8. Atmósfera
- a. Calidad atmosférica
  - b. Capa de ozono
  - c. Efecto invernadero
  - d. Ozono troposférico
9. Energía
- a. Ahorro energético
  - b. Arquitectura bioclimática
  - c. Consumo energético
  - d. Eficiencia energética
  - e. Energías renovables
10. Gestión ambiental
- a. Eficiencia de la administración
  - b. Gasto público
  - c. Prevención de riesgos
  - d. Producción ecológica
  - e. Programas de gestión ambiental
11. Recurso
- a. Conservación ambiental
  - b. Degradación ambiental
  - c. Diversidad biológica
  - d. Huella ecológica
  - e. Regeneración ambiental
12. Residuos
- a. Control de residuos
  - b. Dotación de recogida de reciclaje



- c. Producción de residuos
- d. Reciclaje de residuos
- e. Reciclaje ecológico
- f. Residuos peligrosos

### 13. Ruido

- a. Afección por ruido
- b. Control del ruido
- c. Fuentes del ruido

## **Indicadores medioambientales**

### **Agricultura**

Los indicadores básicos son *agricultura ambiental* que mide el crecimiento de ésta a través de la evolución de la superficie agrícola y el número de explotaciones. Debería tenerse en cuenta el uso de *pesticidas* y *abonos sintéticos* que evalúa su uso en la agricultura.

### **Agua**

*Consumo de agua* que utiliza distintas fórmulas para medirlo (total, por sectores, doméstico, etc...), aparece como la segunda preocupación de los municipios españoles. *Depuración del agua*, determina tanto la existencia y evaluación del servicio como sus resultados. *Ecología del agua*, valora la calidad de los acuíferos y la calidad del agua para el baño o como soporte para la vida. *Abastecimiento de agua* evalúa la calidad del servicio y de las fuentes de abastecimiento. *Reutilización del agua* es un indicador en crecimiento que en ausencia de una política clara de reducción del consumo busca reducir su impacto mediante la reutilización de las aguas usadas. *Ahorro de agua*. El *agua como recurso* que establece la cantidad de agua disponible.

### **Atmósfera**

*Calidad de la atmósfera* incluye los parámetros que determinan el tipo y fuente de los agentes contaminantes como las medidas tomadas para reducir los problemas. *Efecto invernadero* que mide básicamente la emisión de CO<sub>2</sub> seguida de la emisión de NO<sub>2</sub>. Un indicador emergente es *ozono troposférico* que mide el nivel de ozono existente en el aire y el número de días que se superan los límites

saludables para el ser humano. Sería de interés usar *capa de ozono* que mide el índice de recuperación de los CFCs y el reciclaje de los mismos.

### **Energía**

El *consumo energético* que se evalúa el consumo por sectores o habitantes. El indicador *energías renovables* valora la importancia de la utilización de fuentes alternativas de energía. *Eficiencia energética*. *Ahorro energético* evalúa la disminución de éste. *Arquitectura bioclimática*.

### **Gestión ambiental**

Tiene cinco indicadores básicos: La *eficiencia de la administración* que determina la eficacia, evaluando desde los censos municipales de vertederos autorizados a la cantidad de recursos humanos con los que cuenta el área de medio ambiente. El de *programas de gestión* incluye el control de los espacios naturales protegidos o la vigilancia del cumplimiento de la legislación medioambiental. En el de *gasto público* se evalúa el gasto en las distintas áreas relacionadas con el área ambiental y las subvenciones. *Prevención de riesgos* trata de la elaboración y seguimiento de los planes de prevención y emergencia. El de *producción ecológica* determina la utilización de productos que fomentan la sostenibilidad.

### **Recurso**

\*\*Cuenta con cinco indicadores básicos entre los que destacan *conservación ambiental* y *degradación ambiental* con 30 y 29 indicadores respectivamente. En *conservación ambiental* se evalúa básicamente la cantidad conservada, y en *degradación ambiental* la superficie de valor consumida. La *diversidad biológica* cuenta con 17 indicadores dedicados a cuantificarla. Le sigue *regeneración ambiental* en el que se cuantifican las actividades realizadas. Sólo un municipio evalúa su *huella ecológica*.

### **Residuos**

Esta es una de las categorías con más indicadores, y la hemos dividido en seis indicadores básicos. El principal y el más importante para los municipios, con 55 indicadores, es *reciclaje de residuos* en el que se valora la eficacia, por sectores y en peso, de las políticas de reciclaje, lo hemos diferenciado de *reciclaje ecológico*, que sólo cuenta con 3 indicadores, por considerar que este último es un indicador emergente en el que no sólo se evalúa la cantidad de residuos reciclada

sino que el residuo reciclado se incorpora, tras su compostaje, al ciclo natural. El segundo indicador básico en importancia, con 40 indicadores es *producción de residuos*. A través de *dotación de recogida de reciclaje* con 16 indicadores se diferencia la extensión de las políticas dedicadas a promoverlo de la recogida tradicional evaluada a través del indicador básico *control de residuos* que cuenta con 11 indicadores, diferenciado de *residuos peligrosos* que cuenta con 10.

### **Ruido**

Cuenta con tres indicadores básicos. El primero, con 22 indicadores es *afección por ruido*, en donde se incluye tanto la población afectada por los niveles de ruido que superan los límites fijados por la Organización Mundial de la Salud (OMS), como la elaboración de mapas acústicos del municipio. *Control del ruido*, con 14 indicadores, evalúa su impacto a través de actuaciones o denuncias realizadas. Con 4 indicadores contamos con *fuentes del ruido* en el que se mide el origen del ruido, principalmente de vehículos.

#### 4.1.3 Área Social

Este área cuenta con 196 indicadores, agrupados en 7 categorías y en 23 indicadores básicos, que se describen a continuación.

### **Cuadro 66: Categorías e indicadores básicos del área temática social**

#### **Calidad de vida**

Desplazamientos del niño a la escuela

Satisfacción del ciudadano

#### **Educación ambiental**

Atención al ciudadano

Campañas de divulgación ambiental

Control de campañas

Programas de educación ambiental

#### **Población**

Crecimiento de la población

Estructura de la población

Migración

Mortalidad infantil

## **Identidad**

Cultura

Lengua

## **Inclusión social**

Gasto municipal en inclusión social

Inmigración

Población excluida

Programas de inclusión social

## **Participación**

Abstención electoral

Agenda 21

Asociacionismo

Asociacionismo ecológico

Encuestas

## **Seguridad y salud**

Accidentes laborales

Protección civil

## **Calidad de vida**

Esta categoría se creó para dar cabida a dos de los Indicadores Comunes Europeos: *Satisfacción del ciudadano* que cuenta con 6 indicadores y que además de incluir el indicador europeo de la satisfacción con la comunidad local, tiene en cuenta la satisfacción laboral y *desplazamientos del niño a la escuela* que es utilizado por dos municipios.

## **Educación ambiental**

Cuenta con cuatro indicadores básicos, siendo el más importante *programas de educación*, con 32 indicadores que evalúan los programas de formación y la participación en estos programas destacan aquellos que hacen referencia a la participación ambiental, a los programas de formación y a los recorridos señalizados por el espacio rural. En segundo lugar tenemos, con 16 indicadores, *campañas de divulgación* que enumera las iniciativas divulgativas de sensibilización y educación ambiental. Con 11 indicadores tenemos *control de*

*campañas* que valora su número y resultados. *Atención al ciudadano*, con 6 indicadores, recoge el número de consultas sobre medio ambiente recibidas.

### **Población**

Cuenta con cuatro indicadores básicos, siendo el principal *crecimiento de la población* con 6 indicadores, seguido de *estructura de la población* con 4. Con un solo indicador aparecen *migración* y *mortalidad infantil*.

### **Identidad**

La categoría cuenta con dos indicadores básicos, *cultura*, que con 11 indicadores mide principalmente la oferta cultural, y *lengua* que en tres municipios vascos y Calviá mide el conocimiento de la lengua autóctona.

### **Inclusión social**

Aquí nos encontramos con cuatro indicadores básicos, de los que el principal, con 26 indicadores es *población excluida*, seguido por *programas de inclusión social* con 12 indicadores y del *gasto municipal* que mide el gasto en proyectos de cooperación y solidaridad. Dos municipios incluyen indicadores referidos a *inmigración*.

### **Participación**

Esta categoría tiene cinco indicadores básicos, siendo el principal *asociacionismo*, con 18 indicadores, que mide la participación a través del número de asociaciones y su implicación en la vida pública independientemente del *asociacionismo ecológico* que cuenta con 10 indicadores. *Agenda 21*, con 14 indicadores, es el segundo indicador básico en importancia y evalúa las iniciativas a ella asociadas, participación y seguimiento de éstas. De menor importancia son *abstención* con 3 indicadores dedicados a medir la abstención en las elecciones y con 2 indicadores *encuestas* como sistema de acercarse a la opinión pública.

### **Seguridad y salud**

Es una categoría con sólo dos indicadores básicos: *protección civil*, con 2 indicadores y *accidentes laborales* con 1.

#### 4.1.4 Área de urbanismo

Este área tiene 281 indicadores divididos en 4 categorías y 22 indicadores básicos.

**Cuadro 67: Categorías e indicadores básicos del área temática de urbanismo**

**Dotaciones**

Accesibilidad a las dotaciones

Calidad espacial

Zonas verdes

**Gestión y planeamiento**

Adecuación al planeamiento

Densidad de población

Ocupación del suelo

Patrimonio edificado

Rehabilitación

Suelo protegido

Vivienda existente

**Suelo**

Intensidad de urbanización

Recuperación de espacios

Suelo agrícola

Utilización sostenible del suelo

**Transporte**

Aparcamientos

Áreas restringidas al tráfico

Energía en el transporte

Intensidad de tráfico

Movilidad

Seguridad vial

Tasa de motorización

Transporte público

**Dotaciones**

Cuenta con tres indicadores básicos, entre los que destaca el indicador básico *accesibilidad* que con 24 indicadores evalúa el acceso a las dotaciones en

función del tiempo necesario y la proximidad de los ciudadanos a las zonas verdes y servicios básicos. El segundo indicador básico, con 19 indicadores, es *zonas verdes* en las que se mide preferentemente la superficie por habitante. El tercero es *calidad espacial* que busca, con 13 indicadores, valorar la calidad del espacio urbano a través de la extensión de la red verde municipal (longitud y porcentaje de las calles arboladas del municipio) y el equipamiento y mobiliario del espacio público.

### **Gestión y planeamiento**

Este área recoge siete indicadores básicos directamente relacionados con el planeamiento urbanístico y su gestión. El principal es *vivienda existente* que con 18 indicadores se dedica a determinar la situación del parque de viviendas (estado, superficie, ocupación y tipo) y su sobreconstrucción. *Adecuación al planeamiento* con 12 indicadores determina el seguimiento o modificación del planeamiento vigente. *Patrimonio edificado* con 11 indicadores valora la existencia y grado de protección de los edificios y espacios de interés. *Densidad de población* con 10 indicadores se utiliza para determinar la densidad de la población por barrios o en la totalidad del suelo urbano. *Rehabilitación* con 9 indicadores controla el número de licencias o las actuaciones llevadas a cabo en este campo. De menor importancia son *suelo protegido* con cinco indicadores o *ocupación del suelo* con 2.

### **Suelo**

Cuenta con cuatro indicadores básicos que buscan evaluar su consumo. *Intensidad de la urbanización* es el principal, con 22 indicadores en los que se mide el porcentaje de suelo ocupado o urbanizado, la ocupación sostenible o la ocupación de las infraestructuras. *Suelo agrícola* es el segundo con 6 indicadores que miden la superficie agrícola y el porcentaje de regadío o secano sometido a algún tipo de protección. De menor importancia son *recuperación de espacios* con 4 indicadores y *utilización sostenible* con 3.

### **Transporte**

Esta categoría contiene ocho indicadores básicos, siendo el de mayor importancia *áreas restringidas al tráfico* con 33 indicadores, que establecen la longitud y el porcentaje de áreas preferentes peatones y bicicletas. El segundo,

con 29 indicadores, es *transporte público* que mide el número o porcentaje de viajeros sobre el total. *Movilidad* es el tercero, con 20 indicadores que determinan la dependencia del automóvil, el modo de desplazamiento o el número de planes y estudios de movilidad realizados. *Intensidad del tráfico* cuenta con 16 indicadores que miden la intensidad media diaria de vehículos en determinadas zonas y la composición del parque móvil. *Seguridad vial* tiene 13 indicadores dedicados principalmente a evaluar los accidentes de tráfico en el municipio. De menor importancia son *tasa de motorización* con 7 indicadores, *aparcamientos* con 3 y *energía en el transporte* con solo 2 indicadores.

## 6. LA LÓGICA BORROSA COMO HERRAMIENTA

La metodología clásica no tiene las herramientas necesarias para manejar información numérica y lingüística al mismo tiempo. Las técnicas borrosas son herramientas útiles para abordar problemas con vaguedad, inconsistencia y falta de información, y trabaja adecuadamente con las variables lingüísticas y numéricas conjuntamente. Así de puede decir “el agua está bastante clara”, o “un poco turbia”, y trabajar con estas etiquetas. Los conceptos de calidad ambiental (calidad del agua, del aire, del suelo), impacto..., son adimensionales, intangibles y difícilmente cuantificables.

En este sentido, se plantea un modelo que evalué la sostenibilidad de un proyecto mediante la lógica borrosa como herramienta. Por otra parte, el uso de las aplicaciones en la enseñanza de la teoría de conjuntos borrosos ayuda, sin lugar a dudas, a su estudio y mejor comprensión.

La Teoría de los Conjuntos Difusos o Conjuntos Borrosos (“fuzzy set”) se aplica con éxito para resolver problemas de control. Fue introducida por primera vez por Lotfy Zadeh [18] quien se dio cuenta que, utilizando ecuaciones diferenciales, en muchas ocasiones no se llegaba a soluciones prácticas, bien por las simplificaciones que había que introducir, bien por los muchos cálculos que era preciso realizar, por lo que precisó utilizar nuevas herramientas.

Existen ya metodologías que utilizan lógica difusa en la evaluación de impactos ambientales en obra civil como para evaluar el uso de pesticidas en agricultura, el riesgo de contaminación de aguas subterráneas, la contaminación



de vertederos y escombreras, el impacto de actividades mineras. Para más detalle, ver el programa propuesto por [10].

En definitiva, este trabajo propone seguir la metodología clásica de evaluación de proyectos como la propuesta en [10] y utilizar la lógica borrosa y los sistemas de computación con palabras modificando los siguientes aspectos:

- Decidir si un efecto es impacto, y el carácter del mismo, lo cual aumenta la potencia a la hora de modelar, inferir y tomar decisiones sobre conceptos de gran subjetividad.
- Valorar la importancia: El conocimiento es incierto, impreciso e inconsistente por lo que los sistemas de control borroso pueden valorar la importancia de cada impacto. Las variables lingüísticas que definen la importancia: extensión, momento, reversibilidad... se computan y se representan en el intervalo  $[0, 1]$ , siendo conjuntos borrosos lo que permite trabajar con conceptos vagos y valores numéricos imprecisos.
- Determinar los “mejores” indicadores para medir la magnitud y determinar su valor.
- Las escalas de las variables usadas en el cálculo de la importancia no son homogéneas, lo que falsea los resultados y el peso de las mismas en el valor de la importancia de cada impacto. Las funciones de transformación son conjuntos borrosos que permiten transformar las magnitudes medidas en unidades heterogéneas en unidades homogéneas. Existe un grado de subjetividad en la selección de las funciones de transformación que depende del experto.
- La selección de distintas t-normas permite estudiar otras formas de medir el valor (cualitativo y cuantitativo) de cada impacto teniendo en cuenta su importancia normalizada y su magnitud normalizada.
- Clasificar cada impacto en “compatible, moderado, severo o crítico”.

- Las funciones de agregación estudiadas en la lógica borrosa permiten obtener el impacto total de cada alternativa de una obra, utilizando los pesos de los factores ambientales.
- Desarrollar una estrategia para determinar las medidas correctoras que deben incorporarse al proyecto tomando como base la valoración anterior. Todos aquellos impactos cuya valoración se considere que no está en los límites aceptables, debe disminuirse su impacto mediante estas medidas. Ahora la forma de proceder podría ser a la inversa. Partiendo del valor final que debería tener, ajustar las medidas necesarias para conseguirlo utilizando razonamiento aproximado.

Todo este sistema de lógica borrosa, debido al gran número de variables involucradas, debe trabajarse mediante un sistema de computación. En este caso debe ser un sistema que utilice la computación con palabras,. Por tanto, es conveniente que use un sistema difuso basado en reglas. En este trabajo se plantea el uso de la herramienta XFuzzy que tiene un entorno amigable.

## **7. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE PROYECTOS**

Se pueden considerar dos casos de estudio relacionados entre sí:

- Toma de decisión de si un efecto (social, económico o ambiental) produce impacto o no. En definitiva, deducir si un proyecto es sostenible o no
- Toma de decisión del carácter del impacto en los efectos que produzcan impacto.

Se tratará de inferir mediante la utilización de lógica borrosa el simple enjuiciamiento de un efecto, es decir, si el mismo es despreciable o significativo (impacto). Para definir nuestro sistema partiremos inicialmente de las definiciones de los conceptos anteriormente planteados, con el fin de obtener los conjuntos borrosos y las reglas que se usarán para la inferencia.

## **8. CONCLUSIONES**

En este artículo se pone de manifiesto el interés que tiene para la sociedad la enseñanza de la evaluación de proyectos sostenibles, la necesidad de investigar sobre un modelo que utilizando la lógica borrosa permita ayudar a tomar decisiones sobre determinados aspectos de los impactos sociales, económicos o medioambientales del proyecto y que sea una herramienta sencilla de usar por los no especialistas.

Así, en este trabajo se propone un modelo matemático que permita la evaluación de la sostenibilidad social, económica y medio-ambiental de un proyecto. El objetivo es ofrecer un modelo matemático para la Evaluación Integrada de la Sostenibilidad en cualquier tipo de actuación, escenario y para cualquier escala. Esta herramienta permitirá alejarse, a la hora de tomar decisiones, del subjetivismo y/o relativismo al uso basado en intereses coyunturales. Hablamos de una herramienta de soporte para la toma de decisiones, decisiones políticas (política en el sentido de aquello que emerge de los campos tanto público como privado) o cualquier otro tipo de decisión que deba tener en cuenta (no se nos ocurre cual no) la sostenibilidad y esta deba apoyarse, como no, sobre bases técnico / científicas.

## **8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] AZQUETA, D. (1994). Economía, medio ambiente y economía ambiental. Revista Española de Economía. Número monográfico sobre Recursos Naturales y Medio Ambiente.
- [2] BATTELLE COLUMBUS LABORATORY: Environmental Evaluation System for Water Resource Planning. Springfield , 1972.
- [3] CALVO, F., MORENO, B., ZAMORANO, M. AND RAMOS, A. Implementation of a new environmental impact assessment for municipal waste landfills as tool for planning and decision-making process. Renewable & Sustainable Energy Reviews, V 11(1), pp. 98-115, 2007.

- [4] CALVO, F., MORENO, B. Y ZAMORANO, M. Metodología de diagnóstico ambiental de vertederos como herramienta en la planificación ambiental. Proc. I Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente. Madrid, Febrero 2002.
- [5] CARO, R., ORTIZ, S. Y DE RÁBAGO, J. Hacia un nuevo paradigma económico. Economía Ecológica y Educación para la sostenibilidad. UPComillas y Asociación Nacional de Ingenieros del ICAI (edit), pp.65-71. Madrid, 2009.
- [6] COMISION EUROPEA, Guía para la Estrategia Europea de Desarrollo Sostenible, Secretaría General, 1049 Bruselas, Bélgica, 2007.
- [7] CONESA FERNÁNDEZ-VÍTORA, V. Guía metodológica para la Evaluación del Impacto Ambiental. Ed. Mundi-Prensa. Bilbao, 1996.
- [8] CONSTANZA, R., (edit.), Ecological Economics: the Science and Management of Sustainability, Nueva York, Columbia University Press, 1990.
- [9] GALLEGO E., GONZÁLEZ DE PAULA, L., GARMENDIA, L. Y GARMENDIA A. Método de decisión borrosa de si un efecto es impacto ambiental y su carácter. Jornadas internacionales de Didáctica de las Matemáticas en Ingeniería. ETSI Caminos, UPM. Pp. 261-273, 2009.
- [10] GARMENDIA, A., SALVADOR, A., CRESPO, C., Y GARMENDIA, L. Evaluación de impacto ambiental, Incluye CD Rom. Pearson Educación, Prentice Hall, 2005.
- [11] GARMENDIA, A., SALVADOR, A., CRESPO, C., Y GARMENDIA, L. Determinación de las funciones de transformación útiles en la evaluación de impactos ambientales. Pp. 433-442. Primer Congreso Internacional de Matemáticas en Ingeniería y Arquitectura, 2007.

- [12] GARMENDIA, A., SALVADOR, A., CRESPO, C. Y GARMENDIA, L. Enseñanza de la evaluación de impactos ambientales en escuelas técnicas. Una reflexión sobre las funciones de transformación. Pp. 380-382. V Congreso Iberoamericano de docencia universitaria, Universidad Politécnica de Valencia, 2008.
- [13] GÓMEZ OREA, D. Evaluación de Impacto Ambiental. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, 2002.
- [14] MINISTERIO DE LA PRESIDENCIA, Estrategia Española de Desarrollo Sostenible 2007. [www.060.es](http://www.060.es)
- [15] MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE: Guía para la Elaboración de Estudios del Medio Físico. Contenido y Metodología. Secretaría General de Medio Ambiente. Madrid, 1996- 2000.
- [16] TRILLAS, E., ALSINA, C. Y TERRICABRAS, J. M. Introducción a la Lógica Borrosa. Editorial Ariel, 1995.
- [17] XERCAVINS, J. Y CERVANTES, G., Desarrollo sostenible. Ediciones UPC, 2005
- [18] ZADEH, L. A. Fuzzy Sets. Inform. and Control 8, pp. 338–353, 1965.