

UR

BREEAM®  
el certificado de la construcción sostenible

B

AN

La Evaluación  
de la Sostenibilidad  
en la Planificación  
de las Ciudades.

IS

M

O



**Dos de los mayores retos de la ciudad postindustrial son la reducción de su impacto ambiental y la mejora del bienestar de sus habitantes. Estos dos objetivos, hasta hace poco considerados incompatibles, sólo pueden alcanzarse mediante una planificación ecológicamente sensible y socialmente responsable. Para ello, el proceso urbanístico debe saber integrar una amplia variedad de factores; empezando por un profundo conocimiento del clima y del contexto geográfico, pasando por la identificación de las prioridades y preferencias de la comunidad local hasta llegar a una solución coherente y holística.**

**Este libro presenta una serie de reflexiones sobre las variables más influyentes para la consecución de ciudades más sostenibles inspirándose en los criterios de BREEAM Urbanismo, un método internacional de evaluación ambiental del urbanismo desarrollado por el Building Research Establishment (BRE) y adaptado al contexto español por el Instituto Tecnológico de Galicia (ITG).**

# BREEAM<sup>®</sup>

## urbanismo

### La Evaluación de la Sostenibilidad en la Planificación de las Ciudades

#### **Textos de:**

Helen Pineo  
José María Ezquiaga & Javier Barros Guerton  
Nuria Álvarez Lombardero & Francisco González de Canales  
Edgar Kiviet  
Pablo Gugel & Neil Campbell  
Ester Higuera, Emilia Román & Teresa Eiroa  
Luis M. Jiménez, Alexandra Delgado & José Luis de la Cruz  
Ricardo Alvira  
Jorge Rodríguez Álvarez

#### **Casos de Estudio:**

##### **ECO-BARRIO EN VALLECAS**

Ezquiaga Arquitectura Sociedad y Territorio SL

##### **PARQUE CENTRAL DE VALÉNCIA**

UTE Gustafson Porter, Nova Ingeniería, Grupotec, Borgos Pieper

##### **PLAN REGIONAL DE URBANIZACIÓN MARQUÉS DE LA ENSENADA**

Arnaiz & Partners

#### **Coord. de la Edición:**

Jorge Rodríguez Álvarez

#### **Editan:**

ITG<sup>®</sup> Instituto Tecnológico de Galicia, [www.itg.es](http://www.itg.es))

BREEAM<sup>®</sup> en España (Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology, [www.breeam.es](http://www.breeam.es))

**Título completo:**

**La Evaluación de la Sostenibilidad en la Planificación de las Ciudades. BREEAM® Urbanismo**

1ª Edición, Enero 2019

**Edita:**

ITG® (Instituto Tecnológico de Galicia, [www.itg.es](http://www.itg.es))

**BREEAM® en España** (Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology, [www.breeam.es](http://www.breeam.es))

**Edición y coordinación:**

Jorge Rodríguez Álvarez

**Imprime:**

Lugami Artes Gráficas

**Diseño de portada:**

Tony Le Brand

**© Presente edición:**

ITG® organismo certificador en España del sello BREEAM® de construcción sostenible

**© Textos y contenidos gráficos**

Sus respectivos autores.

Las opiniones y contenidos de los trabajos aquí publicados son responsabilidad exclusiva de sus respectivos autores.

Todos los derechos reservados. No se permite ninguna reproducción de este libro, sea parcial o total, del interior o la cubierta, por cualquier medio analógico o digital, sin la previa autorización por escrito de sus respectivos autores.

**Depósito Legal:** C 2400-2018

**ISBN:** 978-84-09-07734-2

## PRÓLOGO

Las herramientas de evaluación ambiental de la edificación comenzaron su desarrollo a principios de los años 90, principalmente en Reino Unido y Estados Unidos. Tras casi 30 años de andadura se puede aseverar que han tenido una notable influencia en las prácticas constructivas y en la difusión y adopción voluntaria de técnicas conducentes a la reducción del impacto ambiental de la edificación. Hasta la proliferación de estas herramientas, los incentivos para sobrepasar las prestaciones determinadas por el marco normativo eran escasos. Era necesaria la existencia de una gran conciencia ambiental por parte del promotor, que se pudiera reflejar en su compromiso con un diseño más sostenible, ya que no existía la posibilidad de un retorno a corto plazo, en términos de mercado. ¿Por qué iba a adoptar soluciones más costosas o tecnologías novedosas si sus ventajas no trascendían al usuario final? Además de esto, no existían barreras para que la “competencia” plantease campañas de márketing proyectando su supuesto compromiso con el medio ambiente en base a criterios ambiguos y puramente subjetivos.

Uno de los motivos por los que estas herramientas han logrado asentarse se debe a que han entendido, de un modo bastante pragmático, la lógica de los diferentes agentes intervinientes en el mundo de la construcción y el urbanismo. A través de su independencia y sistematización se crean incentivos basados en la proyección objetiva de los niveles de comportamiento ambiental de un proyecto desde una perspectiva holística. A diferencia de la normativa, van más allá de los aspectos energéticos, incorporando otros factores no contemplados en la misma (ahorro de agua, regeneración urbana, elementos sociales, etc...). Por otro lado, están planteados con una estructura flexible que permite su constante adaptación y revisión, según evoluciona el contexto tecnológico, normativo y ambiental.

Tras dos décadas de experiencias en la escala del edificio, comienzan a desarrollarse metodologías equivalentes en la escala urbana entre los años 2008 y 2009. Para ello ha sido necesaria la adaptación de las categorías y requisitos a tratar, así como el ajuste a los tiempos y fases propias de los instrumentos de planificación urbanística. Por otro lado, la consideración de factores regionales y locales es fundamental a la hora de realizar una evaluación efectiva y rigurosa. En el caso de BREEAM, existe una coincidencia entre el desarrollo de sus herramientas urbanísticas y un cambio de política en su expansión fuera del Reino Unido. El Building Research Establishment, organismo responsable y creador de BREEAM, emprende una serie de alianzas con socios estratégicos locales que se

encargarán de la adaptación y gestión de los esquemas en los diferentes países. En España, esta alianza se establece con el Instituto Tecnológico de Galicia, dando lugar a BREEAM ES. Desde aquí se coordinará toda la adaptación a los parámetros climáticos, normativos o sociales de los distintos esquemas de evaluación (Residencial, Comercial, En Uso, Urbanismo...).

Esta publicación está, por lo tanto, vinculada al proceso de adaptación de BREEAM Urbanismo al contexto español, llevada a cabo entre el 2009 y el 2012. Se trata de una aportación al debate en torno a la sostenibilidad urbana basada en las experiencias de este proceso, pero también abierta a las aportaciones de expertos y profesionales tanto nacionales como internacionales.

El libro está dividido en dos partes, en la primera se presentan nueve artículos que desarrollan aspectos concretos de la sostenibilidad de la ciudad, desde la participación hasta la forma, pasando por cuestiones culturales (muchas veces olvidadas) o el estudio de metodologías. En la segunda parte se presentan con detalle tres casos de estudio, que se corresponden con tres proyectos piloto que han participado en la fase de adaptación. En este proceso, representantes de los equipos de diseño han colaborado activamente para analizar la viabilidad de la estructura del esquema y de cada uno de los requisitos, además de realizar una evaluación preliminar de cada uno de los proyectos, una fase clave para testear la metodología.

En el primer artículo, Helen Pineo expone una reflexión sobre las barreras existentes en la aplicación efectiva de procesos participativos. Describe, a través de ejemplos, como la falta de planificación adecuada o incluso factores externos no previstos, pueden dar lugar a una distorsión en los resultados de estos procesos o incluso la manipulación de los mismos.

En el segundo artículo, el profesor José María Ezquiaga y Javier Barros Guerton realizan un detallado análisis sobre la aplicación de criterios climáticos sobre tejidos urbanos construidos. Tras contextualizar el marco normativo y las dimensiones ambientales, sociales y económicas, formulan una serie de propuestas de criterios, tanto a nivel general como para cada tejido urbano específico.

A continuación, Francisco González de Canales y Nuria Álvarez Lombardero desarrollan el concepto de la sostenibilidad cultural, una noción mucho menos discutida que otros aspectos más populares en el paradigma

actual. Franciso y Nuria nos hablan del mestizaje cultural en relación de igualdad, la "transculturalidad", como clave del éxito en la mayoría de ejemplos mostrados. Este es un concepto novedoso que se contrapone a otras formas de relación entre culturas presentes en la ciudad actual.

Edgar Kiviet, por su parte, se basa en su amplia experiencia como responsable de proyectos urbanos de gran escala en media Europa para apostar por un tipo de urbanismo sistémico, escalable y dinámico, que sea capaz de revitalizar y regenerar la ciudad conforme evoluciona su sociedad.

Pablo Gugel y Neil Campbell exponen una visión crítica de las certificaciones ambientales urbanas de carácter genérico. Sostienen que una evaluación a medida de cada proyecto permite una mejor integración de aquellos aspectos más relevantes en cada contexto, teniendo en cuenta tanto los objetivos concretos del promotor como la realidad geográfica. Finalmente describen una metodología propia aplicada en el desarrollo de una Ciudad de la Moda en ciudad, Ningbo, China.

Ester Higuera, Emilia Román y Teresa Eiroa describen la experiencia de la aplicación de BREEAM Urbanismo en los trabajos académicos del Máster de Medio Ambiente y Arquitectura Bioclimática de la Universidad Politécnica de Madrid. Tras mostrar el proceso seguido y el resultado de alguno de los trabajos, analizan las principales barreras y oportunidades que presente esquema desde una perspectiva docente, pero también aplicable a casos reales.

Luis Jiménez Herrero, Alexandra Delgado y José Luis de la Cruz se basan en su experiencia conjunta en el Observatorio de la Sostenibilidad de España (OSE, 2005-2013) para desarrollar una reflexión sobre los indicadores estratégicos más efectivos para la sostenibilidad local. Tras un repaso de los principales acuerdos y sus traslación a las políticas locales mediante las Agendas 21, realizan una breve descripción del estado actual y tendencias futuras en el marco 2030.

Ricardo Alvira nos propone una metodología alternativa de desarrollo de indicadores, basado en la teoría de conjuntos o lógica de clases. En vez de partir de cero, propone partir de planteamientos ya acordados que permitan considerar que los parámetros a medir y la forma en que se miden son adecuados.

En el último artículo, abordo un tema recurrente en el debate sobre la sostenibilidad urbana, el problema de la forma, que tradicionalmente se ha venido tratando como la confrontación de dos modelos aparentemente opuestos y excluyentes: la ciudad compacta vs. la ciudad dispersa.

En la segunda parte del libro se muestran los tres los casos de estudio que han participado en la adaptación del esquema BREEAM Urbanismo.

El primero de ellos es el PRAU Marqués de la Ensenada, en Medina del Campo. Se trata de un proyecto urbano que se desarrolla en torno a la rehabilitación de un antiguo cuartel de artillería diseñado originalmente por el arquitecto Ventura Rodríguez. La propuesta llevada a cabo por Arnáiz Consultores trata de integrar en la trama y vida de la ciudad un ámbito que en la actualidad conforma una gran pieza autónoma e introvertida.

El siguiente caso de estudio es el Área de Planeamiento Específico de La Rosilla, en Madrid. El plan tiene su origen en una actuación de realojo de población marginal prevista en el Plan General de 1997. El nuevo planteamiento, realizado por Ezquiaga Arquitectura, Sociedad y Territorio, redefine la delimitación del ámbito de actuación, buscando una mayor continuidad con el tejido del Ensanche de Vallecas y manteniendo la componente social de la actuación, aunque desde una perspectiva más amplia. Las condiciones establecidas en este plan tratan de asegurar la contribución de la actuación al desarrollo urbano sostenible, en aspectos económicos, ambientales y sociales.

El último caso de estudio es también el de mayor dimensión. La urbanización Parque Central de València integrará en el tejido urbano de la ciudad una superficie de más de 65 hectáreas, actualmente ocupada por instalaciones ferroviarias y zonas industriales obsoletas. El proyecto para la regeneración de este espacio fue elegido a través de un concurso de ideas internacional del que resultó ganadora la propuesta elaborada por Gustafson Porter, Borgos Pieper, Grupotec y Nova Ingeniería.

**Jorge Rodríguez Álvarez**  
**Dr. Arquitecto**

Coordinador de la adaptación de BREEAM Urbanismo

## CONTENIDOS:

---

**3 PRÓLOGO**

**8 AUTORES**

**16 LÍMITES EN LA INFLUENCIA DE LOS PROCESOS DE PARTICIPACIÓN**

Helen Pineo

**32 CAMBIO CLIMÁTICO, RECICLAJE URBANO Y PROYECTO SOSTENIBLE**

José María Ezquiaga & Javier Barros Guerton

**48 LO COMÚN Y LO DIVERSO. Hacia una nueva comprensión teórica de un espacio público culturalmente sostenible**

Nuria Álvarez Lombardero & Francisco González de Canales

**62 UN URBANISMO DINÁMICO PARA UNA CIUDAD MÁS SOSTENIBLE**

Edgar Kiviet

**80 URBANISMO SOSTENIBLE Y CERTIFICACIONES AMBIENTALES**

Pablo Gugel & Neil Campbell

**100 LA CONTRIBUCIÓN DE LAS HERRAMIENTAS DE EVALUACIÓN A LA REHABILITACIÓN INTEGRAL DE BARRIOS RESIDENCIALES**

Ester Higuera, Emilia Román & Teresa Eiroa

**110 SOSTENIBILIDAD LOCAL: ENFOQUES ESTRATÉGICOS E INDICADORES URBANOS**

Luis M. Jiménez, Alexandra Delgado, José Luis de la Cruz

**132 UNA APROXIMACIÓN AL DISEÑO DE INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD DESDE LA LÓGICA DE CLASES**

Ricardo Alvira

**148 LA CIUDAD SOSTENIBLE: ¿UNA CUESTIÓN DE FORMA?**

Jorge Rodríguez Álvarez

**166 PLAN REGIONAL DE URBANIZACIÓN MARQUÉS DE LA ENSENADA**

Arnaiz & Partners

**180 ECO-BARRIO EN VALLECAS**

Ezquiaga Arquitectura Sociedad y Territorio SL

**194 PARQUE CENTRAL DE VALÈNCIA**

UTE Gustafson Porter, Nova Ingeniería, Grupotec, Borgos Pieper

---

## **AUTORES**

### **Helen Pineo**

Helen Pineo es una urbanista con diez años de experiencia trabajando en políticas de planificación y desarrollos urbanos a gran escala. Desde septiembre de 2018 es profesora en la Escuela de Arquitectura y Planeamiento Bartlett-UCL , donde su labor docente se centra en la planificación de entornos sostenibles y saludables. El trabajo profesional de Helen se ha desarrollado en la Local Government Association y el Building Research Establishment (BRE), donde ha sido Directora Asociada del programa Cities en los últimos años.

Helen ha dirigido diversos proyectos de investigación y consultoría relacionados con la salud y la sostenibilidad tanto para clientes gubernamentales como privados. Su investigación doctoral explora la integración de herramientas de indicadores de salud en las políticas de planificación urbana. Ha publicado numerosos artículos y documentos de orientación para audiencias académicas y profesionales sobre la incorporación de la sostenibilidad y el bienestar en políticas y desarrollos urbanos. Además participa en diversos comités de expertos para programas gubernamentales, conferencias y revistas académicas.

### **José María Ezquiaga Domínguez**

José M<sup>a</sup> Ezquiaga es Doctor Arquitecto, Premio Extraordinario de Doctorado de la Universidad Politécnica de Madrid (1990), Arquitecto por la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid (1979) y Licenciado en Sociología y Ciencias Políticas por la Universidad Complutense de Madrid (1981).

Ha estado vinculado a la ciudad y al proyecto urbano desde el inicio de su actividad profesional. En los últimos años ha centrado su interés académico y profesional en la investigación teórica e integración proyectual de las diversas escalas, geográficas y sociales, que conforman el territorio y la ciudad. Sus proyectos han sido el medio para la experimentación e investigación sobre el proceso de creación del paisaje contemporáneo.

Ha ocupado cargos de responsabilidad en la administración municipal y autonómica de Madrid y desde 1995 dirige Ezquiaga Arquitectura, Sociedad y Territorio S.L. (EAST). Entre los proyectos que ha dirigido destacan el Proyecto Madrid Centro (Premio Europeo de Urbanismo concedido por el Consejo Europeo de Urbanistas y el Comité de Regiones de la Unión Europea en 2012, y Premio de Investigación de la Bienal Iberoamericana de Arquitectura y Urbanismo en 2012), el Plan Territorial Insular de Menorca (Premio Nacional de Urbanismo 2005 y Premio Europeo Gubbio 2006), y los planes territoriales y urbanísticos de varios

ámbitos de Reserva de la Biosfera y de Patrimonio Mundial UNESCO en Europa y América. En la actualidad dirige en EAST la elaboración del Plan de Acción Territorial del Área Metropolitana de Valencia (PATEVAL), las Directrices de Ordenación del Territorio de Extremadura (DOTEX), el Plan de Ordenación Municipal de Cuenca y el Plan para la revitalización de la Ciudad Colonial de Santo Domingo.

Es profesor Titular de Urbanismo de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Madrid desde 1995, habiendo sido profesor invitado en varias universidades españolas y extranjeras. Desde 2014 es Decano del Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid.

### **Javier Barros Guerton**

Javier Barros Guerton es Arquitecto por la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de A Coruña y la Faculté des Sciences Appliquées de la Universidad Católica de Louvain-la-Neuve (Bélgica) (1995), DEA en urbanismo por el Institut d'Urbanisme de Paris (1998), y cursa estudios de doctorado en la Universidad Politécnica de Madrid. Ha desarrollado su actividad profesional en el ámbito de la arquitectura y el urbanismo, destacando su vinculación desde 1998 a Ezquiaga Arquitectura, Sociedad y Territorio S.L., como coordinador y coautor de planes de escala territorial y urbanística, estudios territoriales y de consultoría. Entre ellos destacan los planes generales de Segovia, Burgos y Cuenca, los territoriales de Extremadura, Área Metropolitana de Valencia y Levante Almeriense, el Proyecto Madrid Centro, el Marco de Planificación Regional y Territorial del Estado de Campeche (México) y el Plan para la revitalización de la Ciudad Colonial de Santo Domingo (República Dominicana).

A lo largo de los últimos años ha impartido clases en diversos cursos de master.

### **Francisco González de Canales y Nuria Álvarez Lombardero**

Francisco González de Canales y Nuria Álvarez Lombardero son cofundadores de Canales & Lombardero y la iniciativa Politics of Fabrication.

Francisco estudió arquitectura y teoría en ETSA Sevilla, ETSA Barcelona y la Universidad de Harvard, y trabajó para Foster + Partners y Rafael Moneo. Ha dado conferencias en Inglaterra, Chile, México, España y Estados Unidos. Entre sus publicaciones recientes se encuentran First

Works (2009), Experiments with Life Itself (2012), Rafael Moneo: Una reflexión teórica a través de la práctica profesional (2013) y Rafael Moneo: Building, Teaching and Writing (2015).

Nuria estudió arquitectura y urbanismo en ETSA Madrid y la Architectural Association y trabajó para Machado & Silvetti Associates. Ha impartido clases en las Universidades de Cambridge, Bartlett, TEC Monterrey y en la Universidad de Sevilla. Su trabajo sobre estudios de género en arquitectura y tipologías urbanas ha sido ampliamente publicado, así como su galardonado libro Arquitectas: Redefining the Practice (2015).

Ambos tienen un doctorado y dirigen la unidad docente Intermediate 8 en la Architectural Association (AA) desde 2009. Han sido finalistas en los Premios FAD 2017 por su libro "Política y Fabricación Digital: un debate en curso" (2017) que recoge la investigación desarrollada mediante su vinculación con la AA, tanto en la unidad docente como en las AA Visiting Schools de Chile y Cuba.

### **Edgar Kiviet**

Edgar Kiviet (MSc-RIBA-ARB) es actualmente director de planificación urbana en RoyalHaskoningDHV. Como un verdadero ciudadano global, ha vivido, estudiado y trabajado en más de un tercio de las ciudades capitales de Europa y en algunas de las mayores metrópolis de Oriente Medio, África y Asia. Esa experiencia influye profundamente en su trabajo y su pasión por la planificación y el diseño urbano, haciendo que la resolución de los retos más críticos de la ciudad contemporánea sean afrontados como un desafío personal. Su trabajo abarca un amplio espectro de escalas, que van desde una "vista satelital" de las estrategias metropolitanas hasta la escala del detalle del espacio público, pasando por la escala de distrito, que cubre planes urbanos y directores.

Su perspectiva es una visión holística y sostenible que impulsa los mejores resultados de entornos y equipos complejos y multidisciplinares. Posee amplia experiencia en los campos de la regeneración, la movilidad y la sostenibilidad urbanas.

Edgar tiene un máster en Arquitectura por la Universidad de Delft, complementado con estudios en la Politécnica de Milán y un estudio de postgrado en la Universidad Politécnica de Madrid. Es profesor colaborador en programas de máster y cursos especializados en universidades y escuelas secundarias.

### **Pablo Gugel Quiroga**

Pablo es arquitecto, especialista en sostenibilidad, diseño ambiental y profesor universitario. Lleva más de una década asentado en Londres donde actualmente es Senior Environmental Designer en Atelier Ten y profesor de Technical Studies en la Architectural Association. Anteriormente ha trabajado en ChapmanBDSP (2011-2015), Grimshaw

Architects (2008-2009) y Díaz&Díaz Arquitectos (2005-2008), participando en proyectos como el Aeropuerto de Heathrow, Midfield Pier, el Maritime Centre of Excellence, o el Lloyd's Register en el Reino Unido. Además, ha participado en talleres y charlas en la Metropolitan University y la Royal College of Arts de Londres.

Como especialista en sostenibilidad, ha trabajado en múltiples proyectos arquitectónicos y planes urbanísticos internacionales. Entre otros, ha participado en el diseño de las oficinas de Google en Londres, el Proyecto Technopark de Sberbank en Moscú, el plan urbanístico Chelsea Barracks, en London, o el proyecto Ningbo+ en China.

Durante los últimos años ha desarrollado una amplia experiencia en estudios de iluminación natural, simulación de consumo energético, confort térmico, huella de carbono, análisis de ciclo de vida y gestión de recursos de agua. También es asesor para la obtención de certificados medioambientales como BREEAM, LEED y WELL. Recientemente ha obtenido su colegiación como "Environmentalist" en el Energy Institute de Londres.

### **Neil Campbell**

El Dr. Neil Campbell es uno de los directores de ChapmanBDSP, donde empezó a trabajar en 1998. Neil están especializado en Diseño Medioambiental y en Sostenibilidad de Edificios y Planes Urbanísticos (incluido el uso de técnicas avanzadas de simulación) y tiene gran experiencia en Ingeniería Mecánica. Actualmente está trabajando en una variada gama de proyectos en el Reino Unido, los Emiratos Árabes Unidos, Nigeria y China. También ha coordinado varios proyectos de investigación y desarrollo en colaboración con la Unión Europea y el Reino Unido, siendo coautor del libro Urban Wind Energy (2009).

### **Ester Higuera**

Ester Higuera es doctora arquitecta, profesora titular de la UPM, y profesora de postgrado del Máster de Medio Ambiente y Arquitectura Bioclimática de la UPM, así como del Máster Universitario de Planeamiento Territorial de la UPM. Ha participado en numerosos cursos de post-grado y conferencias. Lleva más de 15 tesis doctorales como directora y ha sido tutor de más de 60 Trabajos Fin de Máster y Tesinas de la UPM. Desde su tesis doctoral, leída en 1997, trabaja desde la teoría y la práctica en cuestiones de planificación ambiental, urbanismo bioclimático, criterios de acondicionamiento pasivo en la escala urbana, y ordenanzas ambientales (por ejemplo 2005 Ordenanza Bioclimática para Tres Cantos, Madrid; 2009 Plano Solar Urbano para Vitoria-Gasteiz; 2012 Manuales Bioclimáticos para Vitoria-Gasteiz). Ha escrito numerosos artículos y libros, entre los que destacan Urbanismo Bioclimático (2006) y El Reto de la Ciudad Habitable y Sostenible (2009).

### **Emilia Román**

Doctora Arquitecta desde 2014. Profesora Ayudante Doctora del Departamento de Urbanística y Ordenación del Territorio en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. Profesora de postgrado del Máster de Medio Ambiente y Arquitectura Bioclimática (MAyAB) y en el Máster Universitario en Planeamiento Urbano y Territorial (MUPUT), de la Universidad Politécnica de Madrid. Además, ha ejercido su trayectoria profesional como socia de cc60 Estudio de Arquitectura desde su fundación en 1999.

Es miembro del Grupo de Investigación en Arquitectura, Urbanismo y Sostenibilidad (GIAU+S) de la UPM, desde 2009, donde realiza estudios, investigaciones, y proyectos sobre urbanismo sostenible, territorio, paisaje, arquitectura bioclimática e integrada en su medio ambiente, y rehabilitación urbana integral. Ha participado en diversas publicaciones y en la coordinación y docencia de cursos de postgrado y seminarios sobre estas cuestiones, impartidas en colegios profesionales y en distintas universidades nacionales e internacionales. Es Jefa de Redacción de la revista "Cuadernos de Investigación Urbanística" del Departamento de Urbanística y Ordenación del Territorio de la ETSAM, UPM.

### **Teresa Eiroa**

Teresa Eiroa es arquitecta por la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), máster en Medio Ambiente y Arquitectura Bioclimática, y en Planeamiento Urbano y Territorial por la Universidad Politécnica de Madrid; además, es socia de CC60 Estudio de Arquitectura SLP desde su fundación en 1999.

Realiza y participa en el desarrollo de proyectos y obras de edificación residencial e industrial, así como en proyectos de urbanismo y rehabilitación.

Actualmente es profesora en el Máster en Medio Ambiente y Arquitectura Bioclimática de la UPM; anteriormente lo ha sido en las titulaciones de Grado en Arquitectura e Ingeniería de la Edificación de la Universidad Pontificia de Salamanca-Campus de Madrid (UPSAM), en Ordenación del territorio, Urbanismo y Arquitectura Bioclimática. Ha participado en publicaciones y en la coordinación y docencia de cursos de postgrado y seminarios, impartidos en Colegios Profesionales y en distintas universidades nacionales e internacionales.

### **Luis M. Jiménez**

Luis M. Jiménez Herrero es Doctor y Licenciado en Ciencias Económicas y Empresariales e Ingeniero Técnico Aeronáutico. Ha trabajado profesionalmente en los campos de la Ingeniería, Economía, Gestión ambiental y Desarrollo Sostenible, tanto para el sector público como en el privado.

Desde 1979 ha sido profesor en la Facultad de Ciencias Económicas de la Universidad Complutense de Madrid, impartiendo enseñanzas de Medio Ambiente y Desarrollo, y Economía Ecológica y Desarrollo Sostenible. En la actualidad es Profesor Honorífico de la UCM. Es autor de numerosas publicaciones y varios libros sobre Economía del Medio Ambiente, Desarrollo Sostenible y Economía Ecológica. Cabe destacar sus últimas obras: Desarrollo Sostenible: Transición hacia la coevolución global (2017) y Hacia Ciudades y Territorios inteligentes, resilientes y sostenibles. Gestión y Gobernanza para la gran transición urbana (2016).

Ha sido Director Ejecutivo del Observatorio de la Sostenibilidad en España (OSE, 2005 a 2013), dirigiendo informes anuales y temáticos sobre sostenibilidad y los procesos de desarrollo sostenible. Actualmente es Presidente de la Asociación para la Sostenibilidad y el Progreso de las Sociedades (ASYPS) que está dedicada a impulsar respuestas ante el cambio Global para favorecer la transición hacia paradigmas de progreso sostenible.

### **Alexandra Delgado Jiménez**

Doctora Arquitecta y profesora adjunta de urbanismo e Investigadora principal del Grupo At-the-OUTSET, La Arquitectura y el Urbanismo ante las Transformaciones Sociales, Económicas y Territoriales de la Universidad Nebrija. Además, forma parte de la Cátedra Global Nebrija - Santander en Transporte Sostenible. Profesora de varios Másteres y cursos desde 2007, ha impartido docencia en las Universidades de Venecia (IAUV) y La Sapienza de Roma, y en la Comisión Económica de las Naciones Unidas para América Latina y el Caribe (CEPAL).

Como fruto de sus investigaciones ha publicado Evolución y Crisis de Madrid: Una Revisión Crítica del Planeamiento Urbano (2013), Patrimonio Natural Cultural y Paisajístico: Claves de Sostenibilidad Territorial, con la coordinación y autoría principal (OSE, 2009), y numerosos capítulos y artículos en revistas nacionales e internacionales.

Dirige la oficina AD Arquitectura Urbana, comprometida con la sostenibilidad urbana y territorial y centrada en el análisis e intervención con diferentes instrumentos: arquitectura, urbanismo, territorio y paisaje. Ha coordinado numerosas Directrices Territoriales de Planeamiento y Planes Generales, como la Revisión Parcial del PGOU 1985 y Modificación del PGOU 1997 en los ámbitos afectados por la sentencias del TS y TSJM, MADRID, entre otros, así como Planes Parciales, entre los que destaca la Revisión del Plan Parcial de Reforma Interior del APR 08.03 Prolongación de La Castellana del PGOU de Madrid 1997. En 2017 ha recibido el Primer premio del Concurso internacional de proyectos para la ordenación del ámbito urbano y espacial del antiguo Hospital Central de Asturias (HUCA) en El Cristo-Buenavista, Oviedo, junto a Juan Tur y

Daniel Cortizo. Ha recibido, asimismo, el premio internacional de Best Practice Short List en el marco del 8º Concurso Internacional de Buenas Prácticas de Naciones Unidas 2010, como Responsable de la Plataforma de Sostenibilidad Urbana y Territorial del Observatorio de la Sostenibilidad en España, y la Beca Internacional Bernd Steinacher 2013-2014 de METREX a jóvenes urbanistas e investigadores.

### **José Luis de la Cruz Leiva**

José Luis de la Cruz Leiva es Licenciado en Ciencias Biológicas (UCM), Máster en Medio ambiente: Dimensiones humanas y socioeconómicas (UCM), Graduado en Ciencia Política y de la Administración Pública (URJC), Diplomado en Gestión y Administración pública (URJC) y Técnico Superior en Auditorías Ambientales y Análisis de Riesgos. Además tiene un Máster en Prevención de Riesgos Laborales.

Desde 1992 ha desarrollado su carrera profesional en el análisis e implementación de políticas ambientales. En sus inicios trabajó en consultoría ambiental, en implantación de estrategias de desarrollo sostenible en empresas y municipios: Sistemas de Gestión Ambiental, ejecución de la Agenda Local 21 y análisis de indicadores.

Ha sido responsable del Área de Proceso de Sostenibilidad en el Observatorio de la Sostenibilidad en España desde 2006 hasta su desaparición en 2013. Durante estos años realiza análisis de aplicación de políticas de sostenibilidad del medio ambiente en la administración pública y en el ámbito empresarial. Entre 2010 y 2016 es coordinador del Centro para la Sostenibilidad y Eco-innovación UAH. Actualmente es coordinador de proyectos y secretario de la Asociación para la Sostenibilidad y el Progreso de las Sociedades (ASYPS). Además, es co-autor de numerosas publicaciones sobre el análisis, la medición y la aplicación de las políticas de sostenibilidad de la empresa y la administración pública.

### **Ricardo Alvira**

Ricardo Alvira es Arquitecto y DEA por la Universidad Politécnica de Madrid y Dr. Arquitecto por la Universidad Politécnica de Cartagena. Durante el periodo 2000-2009 trabajó en el proyecto y ejecución de proyectos arquitectónicos de media-gran escala, aproximándose a la escala barrio-ciudad; entre otros: un barrio residencial en el sur de Madrid, rascacielos y centros comerciales en España y Centroamérica, y un campus universitario en el norte de África. Desde el año 2010, aprovecha su experiencia como proyectista, para diseñar herramientas matemáticas que posibiliten la integración de la sostenibilidad como criterio de decisión y proyecto en la transformación de entornos construidos de ámbito barrio-ciudad. En los últimos años, compagina esta tarea con la investigación en teoría de elección social, votación y diseño de leyes electorales. En la actualidad, está redactando su segunda Tesis Doctoral, en el campo de la Ciencia Política y de la Administración.

## **Jorge Rodríguez Álvarez**

Jorge Rodríguez Álvarez es doctor arquitecto, especializado en el diseño y planeamiento sostenibles. Realizó su tesis doctoral en la Universidad de A Coruña, con una estancia en el Centro de Análisis Espacial Avanzado (CASA) de la UCL –Bartlett, por la que obtuvo el Premio Extraordinario.

Anteriormente fue becado por la Fundación Barrié de la Maza para realizar el Master of Science in Sustainable Environmental Design de la Architectural Association School of Architecture de Londres (AA). En el 2008, tras finalizar sus estudios en la AA, se incorpora como docente en el mismo programa. Desde el 2009 es profesor de la ETSA de A Coruña, España, donde imparte diferentes materias de Urbanismo, Paisaje y Sostenibilidad. Además, ha sido invitado de forma regular a programas de postgrado, como el Máster de Vivienda Colectiva y el Máster in City Science de la Universidad Politécnica de Madrid, el Máster de Arquitectura Bioclimática de la Universidad Isthmus de Panamá o el Máster en Energía Renovables y Sostenibilidad de la Universidad de Santiago de Compostela.

En el 2015 obtiene un RIBA Research Trust Award para realizar una investigación sobre el comportamiento ambiental de los edificios de viviendas de Londres. Ha coordinado varios libros y escrito numerosos artículos y ponencias en revistas y conferencias, destacando el “Best Paper Award” recibido en el PLEA 2016 Los Ángeles, por una ponencia realizada conjuntamente con Juan Montoliu Hernández, sobre la recuperación de estructuras abandonadas a consecuencia de la crisis inmobiliaria de 2008.

# UNA APROXIMACIÓN AL DISEÑO DE INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD DESDE LA LÓGICA DE CLASES

Ricardo Alvira  
Universidad Politécnica de Madrid

## 1. Introducción

La preocupación actual por la sostenibilidad ha llevado al desarrollo de numerosos modelos para poder evaluarla en forma cuantitativa; modelos generalmente compuestos por diferentes indicadores cuyo número vemos incrementarse día a día. Y este incremento constante, que puede parecer algo positivo (aparentemente aumenta la diversidad de indicadores disponibles) encierra una cuestión preocupante; la carencia de una base común para el diseño de indicadores hace que cada nuevo modelo que aparece plantee otra vez la cuestión prácticamente desde cero, renunciando a aprovechar indicadores ya existentes.

Por ello, el objetivo de este artículo es proponer una metodología que pueda constituir una base común para la formulación de indicadores de sostenibilidad, a partir de planteamientos suficientemente acordados, que permitan considerar que lo que se está midiendo y cómo se está midiendo son adecuados para los objetivos buscados<sup>1</sup>. La metodología que se va a proponer se asienta sobre principios suficientemente aceptados en la Teoría de Conjuntos [o lógica de clases] en sus dos aspectos:

- La Teoría de Conjuntos Clásica o lógica booleana<sup>2</sup> nos permitirá conceptualizar la sostenibilidad desde el “Principio de no contradicción”.
- La Teoría de Conjunto Difusos o lógica difusa<sup>3</sup> nos va a proporcionar el concepto de “grado de pertenencia” que será equivalente al valor del indicador.

## 2. Lógica y teoría clásica de conjuntos: sostenibilidad e insostenibilidad como conjuntos complementarios

La Teoría de Conjuntos clásica clasifica objetos matemáticos<sup>4</sup> asignando a cada objeto ‘x’ una función de pertenencia a una clase o conjunto<sup>5</sup> ‘a’  $f_a[x]$ , que se puede expresar como en [1].

$$f_a[x] = \begin{cases} 0 & \text{si } x \notin a \\ 1 & \text{si } x \in a \end{cases} \quad [1]$$

1 Usamos esta expresión, porque aunque la metodología se va a exponer dirigida a la formulación de indicadores de sostenibilidad, en realidad puede usarse para el diseño de indicadores referidos a otros ‘conceptos’.

2 Boole, 1854

3 Zadeh, 1965

4 Podemos situar el origen de la lógica de conjuntos clásicos en la ‘necesidad de clasificar objetos y conceptos’ (Oporto, 2005)

5 Existe una diferencia entre ‘clase’ y ‘conjunto’; ‘un conjunto es una clase que pertenece a otra clase’ (Ivorra, 2009). Sin embargo, a efectos del presente trabajo consideraremos ambos términos equivalentes a ‘clase’

Es decir, que la función de pertenencia de 'x' al conjunto 'a' sólo puede tener dos valores: tomará el valor 0 si 'x' no pertenece al conjunto, o el valor 1 si 'x' pertenece al conjunto<sup>6</sup> (Fig. 1).

La pertenencia según la Teoría de Conjuntos implica la idea de "conceptos mutuamente excluyentes", que definiremos como aquellos conceptos [o cualidades] cuya intersección es vacía y su unión proporciona el universo del discurso. Lo que matemáticamente podemos expresar como en [2] y [3]

$$X \cup \neg X = \Omega [R] \quad [2]$$

$$X \cap \neg X = \emptyset \quad [3]$$

Esto nos permite una primera conceptualización de la Sostenibilidad de los Sistemas Complejos Adaptativos [SCA]:

Supongamos el conjunto formado por todos los SCA, y dividámoslo en dos subconjuntos:

- Llamaremos 'S' o 'Sostenibilidad' al conjunto formado por todos aquellos SCA que son 'sostenibles'<sup>7</sup>.
- Y llamaremos 'IS' o 'insostenibilidad' al conjunto complementario de S [no-S], 'aquel que contiene todos los SCA que son 'no sostenibles'.

Según los criterios indicados, tendremos que:

$$\begin{aligned} S \cup IS &= SCA = \Omega [R] \\ S \cap IS &= \emptyset \end{aligned} \quad [4]$$

Es decir que la unión de S e IS debe comprender al total de SCA, mientras que su intersección necesariamente será vacía. El inconveniente de esta interpretación desde la lógica de conjuntos binaria es que aún siendo teóricamente correcta<sup>8</sup> es demasiado restrictiva, ya que no admite "grados de pertenencia" [que a su vez implican "grados de exclusión"] y que, sin embargo, son los que caracterizan en su mayor parte a la realidad<sup>9</sup>.

Para resolverlo, será necesario revisarlo desde la Lógica Difusa.

6 Por ello, a la lógica de clásica de conjuntos se la denomina también 'lógica binaria'. Por ejemplo, una 'taxonomía' es una 'clasificación' de elementos en conjuntos clásicos.

7 Para este ejercicio matemático no nos preocupa todavía cual es la definición de 'sostenible'.

8 Podemos decir que representa las dos únicas posibles "clases" de SCA cuando T tiende a infinito

9 Especialmente si consideramos períodos de tiempo [T] más reducidos, en los cuales podremos encontrar SCA que no son totalmente sostenibles / insostenibles, ¿a cuál de los dos conjuntos anteriores pertenecería?.

$$f_a [x] = \text{ent} \left[ \frac{x}{b} \right]$$

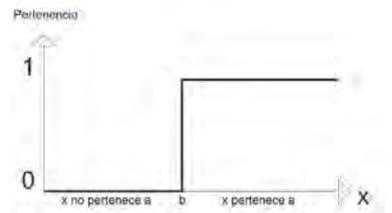


Fig. 1. Función de pertenencia binaria. 'b' es el valor de x a partir del cual x pasa a formar parte del conjunto 'a'.

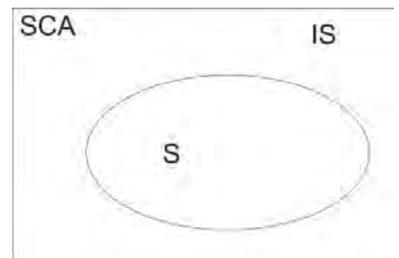


Fig. 2. Los conjuntos 'Sostenibilidad' [S] e 'Insostenibilidad' [IS] son complementarios en el 'universo' SCA

### 3. Lógica y teoría de conjuntos difusos: la sostenibilidad como 'grado de pertenencia'

La lógica difusa surge como un desarrollo de la lógica binaria o clásica<sup>10</sup> para hacer frente a situaciones intermedias que admiten grados de pertenencia y de exclusión.

Un conjunto difuso 'a' es una clase caracterizada por una función de pertenencia 'f<sub>a</sub>[x]' que asocia un número del rango [0,1] a cada elemento 'x' de un dominio 'X'<sup>11</sup>:

$$a = \{[x, f_a[x]] | x \in X\} \quad [5]$$

$$f_a[x] \rightarrow [0,1]$$

La función de pertenencia puede tener cualquier valor en el rango [0,1] adquiriendo el significado de grado de pertenencia, y nos permitirá cuantificar la sostenibilidad e insostenibilidad en términos de "grado de sostenibilidad/insostenibilidad"<sup>12</sup>:

- El grado de sostenibilidad será el "grado de pertenencia de 'I' al conjunto Sostenibilidad"

$$S_T[I]_x = f_s[I] \quad [6]$$

- El grado de insostenibilidad será el "grado de pertenencia de 'I' al conjunto Insostenibilidad"

$$IS_T[I]_x = f_{is}[I] \quad [7]$$

Y por tanto el grado de sostenibilidad de un Sistema 'I' tendrá un valor entre 0 y 1, pudiendo caracterizar tres valores con diferente significación:

---

10 Hay que indicar que la Lógica Difusa (propuesta por Zadeh, 1965) se asienta sobre el concepto de "grado", que ya estaba presente en la Teoría de la Probabilidad (ver Hacking, 1995 y Boole, 1854). Por tanto, no debe considerarse una ruptura con la "lógica anterior", sino un desarrollo progresivo; una resolución de problemas y planteamientos ya presentes en las teorías anteriores. La propia definición de "probabilidad" como una "medida de la verdad de ciertas afirmaciones" (Boole, 1854:190) comparte en gran medida la base conceptual que servirá para caracterizar las funciones de pertenencia difusas. La lógica difusa amplía la "aplicabilidad" del Principio de Contradicción; mientras que la lógica clásica solo puede utilizarse con conceptos "estrictamente" excluyentes [se 'es' o no se 'es', por ejemplo, hombre y águila], la lógica difusa permite su utilización con cualquier concepto; cualquier cualidad que se pueda "ser parcialmente", puede modelarse en términos difusos. Cualquier elemento puede ser caracterizado por el grado en que es una cualidad y no es la no-cualidad.

11 Esta definición y la mayoría de las siguientes están extraídas de Zadeh, 1965

12 Será el que nos permita responder a la pregunta planteada anteriormente en relación con los SCA que no son totalmente sostenibles ni totalmente insostenibles.

- $ST[I]\% = 1$  la pertenencia al conjunto "Sostenibilidad" es completa, y por tanto la pertenencia al conjunto "Insostenibilidad" es nula.
- $0 < ST[I]\% < 1$  la pertenencia al conjunto "Sostenibilidad" es parcial, y complementaria de la pertenencia al conjunto "Insostenibilidad".
- $ST[I]\% = 0$  la pertenencia al conjunto "Sostenibilidad" es nula, y por tanto la pertenencia al conjunto "Insostenibilidad" es completa.

### 3.1. Algunas propiedades de los conjuntos difusos

Vamos a hacer una enumeración de algunas propiedades de los conjuntos difusos interesantes para este trabajo<sup>13</sup>.

#### COMPLEMENTARIO

El complementario de un conjunto A se escribe como  $\neg A$  y se define como:

$$f_A[x] = 1 - f_{\neg A}[x] \quad [8]$$

#### CONTENCIÓN

Si A está contenido en B su función de pertenencia  $f_a[x]$  es menor que la de B,  $f_b[x]$ <sup>14</sup>

$$\forall x \in X: A \subseteq B \rightarrow f_a[x] \leq f_b[x] \quad [9]$$

Esta propiedad impone una condición de gran importancia; la sostenibilidad de un sistema I siempre será como máximo igual a la del entorno al cual tiene acceso 'I'<sup>15</sup>.

#### UNIÓN

La unión de dos conjuntos difusos A y B con funciones de pertenencia respectivas  $f_a[x]$  y  $f_b[x]$  es un conjunto difuso C, cuya función de pertenencia será  $f_c[x]$  igual a:

$$\forall x \in X: C = A \cup B \rightarrow f_c[x] = \max[f_a[x] \cap f_b[x]] \quad [10]$$

<sup>13</sup> Esta revisión no pretende ser exhaustiva, habiéndose excluido aquellas propiedades que no interesan para la presente revisión

<sup>14</sup> Se ha modificado ligeramente la propuesta original de Zadeh (1965: 340) para excluir el supuesto de que A sea menor que B, pero no este contenido en B (supuesto que no nos interesa).

<sup>15</sup> Este matiz es muy importante; un entorno puede destruirse pero un sistema seguir perviviendo si dicho sistema puede 'desplazarse' a un entorno diferente. Sin embargo, el desarrollo de esta cuestión excede el presente trabajo

## INTERSECCIÓN

La intersección de dos conjuntos difusos A y B con funciones de pertenencia respectivas  $f_a[x]$  y  $f_b[x]$  es un conjunto difuso C, cuya función de pertenencia será  $f_c[x]$  igual a:

$$\forall x \in X: C = A \cap B \rightarrow f_c[x] = \min[f_a[x] \cap f_b[x]] \quad [11]$$

## VALORES DE SIGNIFICACIÓN O CORTE

Supone evaluar la pertenencia en términos de significación; es decir, considerar que a partir [o por debajo] de un determinado valor la pertenencia es total [o nula].

Si una función de pertenencia tiene dos valores de corte  $\alpha, \beta \in [0,1]$ , tendremos que:

$$\begin{aligned} f_a[x] < \alpha &\rightarrow x \notin A \\ \alpha < f_a[x] < \beta &\rightarrow x \in_{\alpha} \neg A \wedge x \in_{\beta} A \\ f_a[x] > \beta &\rightarrow x \in A \end{aligned} \quad [12]$$

Los valores de corte serán útiles para cierto tipo de modelos, facilitando la interpretación de la sostenibilidad<sup>16</sup>:

- Sistemas con valor de S muy elevado tendrán elevada resiliencia, y desde ciertas perspectivas podrán ser considerados totalmente sostenibles, aunque  $S < 1$ .
- Sistemas con valor de S muy reducido tendrán muy reducida resiliencia, y desde ciertas perspectivas podrán ser considerados totalmente insostenibles, aunque  $S > 0$ .

De las fórmulas anteriores podemos enunciar que:

$$f_s[V] \cup f_{is}[V] = \Omega = 1 \quad [13]$$

De lo que se deduce...

$$f_s[V] = 1 - f_{is}[V] \quad [14]$$

---

<sup>16</sup> Los valores de corte son útiles para indicadores orientados a la toma de decisiones; establecen los umbrales a partir de los cuales un valor del indicador se debe considerar una 'decisión negativa o positiva'.

Y por tanto, el grado de insostenibilidad de I será:

$$IS_T[I]_{\mathbf{x}} = 1 - S_T[I]_{\mathbf{x}} \quad [15]$$

Y esto es fundamental, porque significa que la ausencia de sostenibilidad total implica necesariamente presencia de cierta insostenibilidad del sistema<sup>17</sup>.

Lo que nos anuncia la existencia de un valor "frontera" para  $ST[I]=0,5$ ; si el grado de pertenencia de I al conjunto "Sostenibilidad" es inferior a 0,5, entonces I pertenece en mayor medida al conjunto "Insostenibilidad" que al conjunto "Sostenibilidad"; el sistema es más insostenible que sostenible<sup>18</sup>

Lo que podemos expresar como:

$$f_s[i] < 0,5 \leftrightarrow f_s[i] < f_{is}[i] \quad [16]$$

### 3.2. Representación gráfica de funciones de pertenencia

Las funciones de pertenencia pueden representarse gráficamente, lo que nos va a permitir deducir dos cuestiones importantes:

La primera de ellas es la existencia de dos valores o puntos singulares para cada variable 'i':

- El valor 'a' tal que  $i \leq a$  indica pertenencia cero de I al conjunto "Sostenibilidad" [y por tanto total pertenencia de I al conjunto "Insostenibilidad"]

$$\exists a: i \leq a \leftrightarrow f_s[i] = 0 \wedge f_{is}[i] = 1 \quad [17]$$

- El valor 'b' tal que  $i \geq b$  indica pertenencia total de I al conjunto "Sostenibilidad" [y por tanto la pertenencia de I al conjunto "Insostenibilidad" es cero]

$$\exists a: i \leq a \leftrightarrow f_s[i] = 0 \wedge f_{is}[i] = 1 \quad [18]$$

<sup>17</sup> Esto es importante por cuanto indica que si  $S < 1$ , aunque un estado sea estacionario poseerá cierto grado de 'insostenibilidad', lo que podremos interpretar como una reducción de resiliencia. El único estado totalmente sostenible será aquel cuyo  $S=1$ . Esto será necesario tenerlo en cuenta al utilizar los 'valores de corte'; no todos los valores de corte serán válidos, y cuando se establezcan valores de corte, será necesario hacerlo individualmente para cada variable diferente.

<sup>18</sup> Podemos decir por tanto, que  $S > 0,5$  debería considerarse un valor de corte inferior 'mínimo' en la toma de decisiones públicas.

$$f_s [i] = \max \left[ \min \left[ \frac{i - a}{b - a}, 1 \right], 0 \right]$$

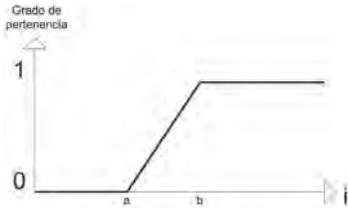


Fig. 3. Representación función lineal de pertenencia difusa, siendo a el valor para el cual la pertenencia es cero y b el valor para el cual la pertenencia es total.

Ambos valores serán fundamentales para la formulación de la sostenibilidad de un sistema; 'a' será el umbral o límite de insostenibilidad y 'b' el límite u objetivo de sostenibilidad del sistema l en relación con la variable i, y su existencia será condición necesaria para poder considerar que i sea una 'variable relevante para la sostenibilidad'.

A partir de esta definición de límites podemos por tanto enunciar una primera definición del concepto "variable relevante para la sostenibilidad de un sistema", que será...

...aquella variable para la cual existe al menos un límite de insostenibilidad y un límite de sostenibilidad

La segunda cuestión interesante de la representación gráfica de las funciones de pertenencia es que permiten sintetizar en un solo gráfico la pertenencia a un conjunto y al conjunto complementario, y por tanto "sostenibilidad" e "insostenibilidad", como conjuntos complementarios, pueden ser representados en la misma gráfica<sup>19</sup> (Fig. 4).

$$f_s [i] = \max \left[ \min \left[ \frac{i - a}{b - a}, 1 \right], 0 \right]$$

$$f_{is} [i] = 1 - f_s [i]$$

$$f_{is} [i] = \max \left[ \min \left[ 1 - \frac{i - a}{b - a}, 1 \right], 0 \right]$$

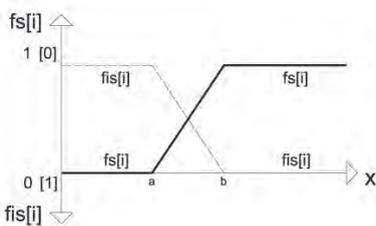


Fig. 4. Funciones de pertenencia a los conjuntos 'sostenibilidad' f\_s [i] e 'insostenibilidad' f\_{is} [i], para un indicador 'i'.

#### 4. Formulación de indicadores de sostenibilidad: el grado de sostenibilidad de un sistema en relación con las variables que lo describen

Hemos revisado los conceptos para la formulación de los indicadores de sostenibilidad de un sistema en relación con sus diferentes variables relevantes, que permiten enunciar que un indicador de sostenibilidad de un sistema l en relación con una variable i - f\_s [i] o S [i]%- será la función de pertenencia del sistema al conjunto "Sostenibilidad" para el rango de valores posibles de 'i'.

La formulación matemática de los indicadores de sostenibilidad de un sistema 'l' será equivalente a la formulación de las funciones de pertenencia de 'l' para cada una de sus variables relevantes; el 0 significará la no pertenencia a 'S' [y por tanto la pertenencia total al conjunto "insostenibilidad"], mientras que el 1 significará la pertenencia total al conjunto sostenibilidad [y nula pertenencia al conjunto "insostenibilidad"]. Estas afirmaciones nos permiten otra definición de "variable relevante" para la sostenibilidad como aquella cuyos valores pueden hacer que el sistema 'l' pertenezca tanto al conjunto "Sostenibilidad" como al conjunto "Insostenibilidad", y que por tanto son expresables en forma de funciones de pertenencia del sistema 'l' a cualquiera de dichos conjuntos<sup>20</sup>.

<sup>19</sup> E incluso aunque no se haya representado a ambos, la representación de uno implica a la del otro, puesto que existe una simetría horizontal en f\_s [x]=0.5; línea que separa la pertenencia a un concepto en mayor grado que al otro.

<sup>20</sup> La función de pertenencia puede referirse a cualquiera de los dos conjuntos ya que del valor de cada una se deduce de la otra.

Las funciones de pertenencia se convierten por tanto en un instrumento fundamental para la formulación de indicadores de sostenibilidad. Sin embargo, previamente a abordar la formulación de indicadores, es necesario hacer dos apuntes en relación con la utilización del término 'sostenibilidad' referido a una variable:

- La sostenibilidad no es una característica de las variables, sino de los sistemas y por tanto la sostenibilidad que implica un determinado valor de una misma variable puede [y suele] ser diferente para diferentes sistemas<sup>21</sup>
- El significado de una 'predicción de sostenibilidad' tiene que revisarse siempre en relación con el plazo de predicción<sup>22</sup>.

Por ello siempre nos referiremos al grado de sostenibilidad del sistema 'I' en relación con la variable 'i' en el momento temporal 'T', lo que expresaremos como  $ST[i]_T\%$ , siendo  $T=0$  el momento actual. Vamos a revisar la importancia de los límites de sostenibilidad/insostenibilidad para la formulación de los indicadores de sostenibilidad.

#### **4.1. Límites de sostenibilidad: sostenibilidad de i en relación con el estado inicial de una variable**

Hemos indicado que podemos formular la sostenibilidad de un sistema 'I' en relación con la variable 'i' como el grado de pertenencia de 'I' al conjunto "Sostenibilidad" en función del rango de valores posible de dicha 'i'. Además, hemos definido los límites de una variable como los valores que delimitan el rango de sus valores que producen la pertenencia completa al conjunto sostenibilidad e insostenibilidad del sistema 'I'. La existencia de los límites será por tanto condición necesaria para que una variable sea 'relevante'<sup>23</sup>, y serán los que nos permitan calcular la sostenibilidad para dicha variable. En su forma más sencilla, serán dos parámetros que dividen en tres zonas el efecto sobre la sostenibilidad de I del rango de valores posibles de la variable i<sup>24</sup>:

---

21 De hecho, un valor determinado de una variable podría implicar sostenibilidad para un sistema e insostenibilidad para otro diferente [lo que explica los conflictos sistema-entorno, o entre diferentes sistemas en un mismo entorno]. Por ello siempre nos referimos a la 'sostenibilidad de un sistema I en relación con una variable i'; ...una variable no puede ser descrita en términos de 'sostenibilidad' sin referirla a un sistema determinado.

22 Sin embargo, una revisión detallada de esta cuestión excede –con mucho– el contenido del presente trabajo.

23 Para que una variable sea relevante para la sostenibilidad de un sistema, dicha variable debe poder producir tanto sostenibilidad como insostenibilidad si no existen 'límites' para una variable del sistema [independientemente de que puedan o no ser conocidos], no existen problemas de insostenibilidad en relación con la misma y por tanto no es relevante.

24 Bien porque existe incertidumbre en relación con el valor exacto, o bien porque exista un valor a partir del cual el cambio no sea inevitable, pero se acelere exponencialmente, constituyendo por tanto un rango de valores que 'se debería evitar'.

- El primero será el valor de 'i' para el cual 'I' alcanza la insostenibilidad y que hemos llamado "Umbral o límite de Insostenibilidad".
- El segundo será el valor de 'i' a partir del cual 'I' alcanza el estado sostenible y que hemos llamado "Objetivo o Límite de Sostenibilidad".

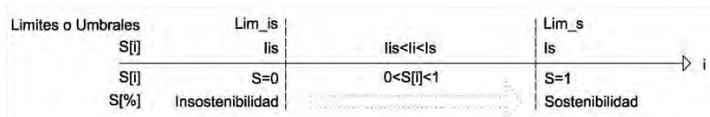


Fig. 5. Relación entre valor de una variable, límites o umbrales y sostenibilidad e insostenibilidad

Es importante señalar varias cuestiones en relación con los límites:

La PRIMERA es que estos límites pueden ser valores exactos, pero también rangos de valores<sup>25</sup>.

La SEGUNDA se relaciona con el principio de inclusión [o contención] que indica que la sostenibilidad de cualquier sistema será como máximo igual a la de su entorno, lo que implica que:

- Para determinar la sostenibilidad de cualquier sistema I, será necesario evaluar la sostenibilidad de las variables relevantes de su entorno<sup>26</sup>
- Aquellas variables que sean relevantes tanto para el sistema como para el entorno, tendrán más de dos límites<sup>27</sup>

La TERCERA es que para algunas variables, un sistema puede tener más de dos límites<sup>28</sup>.

La CUARTA es que estos valores pueden tener un carácter dinámico, pudiendo deberse a varias causas:

- El estado de las diferentes variables del sistema puede modificar los límites de sostenibilidad de las demás variables<sup>29</sup>.
- Cualquier cambio en el modelo sistema-entorno puede modificar los límites de sostenibilidad, incluyendo la propia evolución natural<sup>30</sup>.

25 Para una explicación relacionada con los límites del ecosistema global 'Tierra', se recomienda Röckstrom et al., (2009)

26 Por la propiedad de 'contención' cualquier variable relevante para la sostenibilidad de un entorno será relevante para la sostenibilidad de aquellos sistemas que contiene.

27 Ya hemos comentado que la sostenibilidad no es una característica de las variables sino de los sistemas, y por tanto las variables tendrán diferente significado –y límites- para un Sistema y su Entorno

28 Como norma, las variables tendrán entre dos y cuatro límites de sostenibilidad/ insostenibilidad. Posteriormente revisaremos algunos ejemplos.

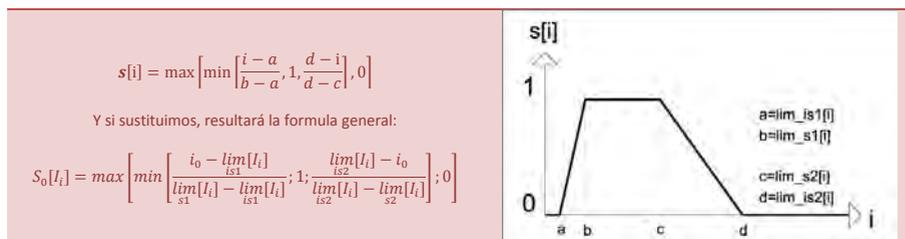
29 Esto afecta sobre todo a los umbrales de insostenibilidad (ver Röckstrom et al., 2009). Los autores sugieren que cuando ciertas variables de un sistema se acercan a su umbral de insostenibilidad, se reduce el rango de valores sostenibles para las otras variables del sistema, es decir, se desplazan los 'umbrales de insostenibilidad' para otras variables del sistema.

30 La componente comparativa del desarrollo hace que el 'desarrollo' de unos sistemas pueda modificar los 'límites' para otros sistemas, y por tanto deberán determinarse en cada

## 4.2. Formulación de la sostenibilidad para diferentes tipos de variables

Existen muchas formulaciones posibles de funciones de pertenencia, teniendo la peculiaridad de que casi todas ellas pueden ser deducidas –por reducción- desde las formulaciones con cuatro límites: dos de sostenibilidad y dos de insostenibilidad<sup>31</sup>.

Tabla 1. Funcion de pertenencia y representacion gráfica para variable con cuatro limites



FUENTE: elaboracion propia con las siguientes NOTAS:

- 1) Los codigos utilizados en la formula son:
  - a.  $S_0[i]$  \_sostenibilidad del sistema I en relación con la variable de estado i en el momento actual
  - b.  $i_0$ \_ valor de la variable i en el momento actual
  - c.  $\lim_{s1}[i]$ \_límite de insostenibilidad 1 del sistema I en relación con la variable i
  - d.  $\lim_{s2}[i]$ \_ límite de insostenibilidad 2 del sistema I en relación con la variable i
  - e.  $\lim_{s1}[i]$ \_ límite de sostenibilidad 1 del sistema I en relación con la variable i
  - f.  $\lim_{s2}[i]$ \_ límite de sostenibilidad 2 del sistema I en relación con la variable i

Dado la brevedad del presente trabajo, vamos a revisar otros tipos de formulaciones posibles directamente mediante la revisión de ejemplos

## 4.3. Ejemplos de indicadores formulados según la metodología propuesta

Vamos a revisar ejemplos que permitan plantear diferentes formulaciones, siendo todos ellos adaptaciones de indicadores ya existentes<sup>32</sup>.

### a. Indicador de sostenibilidad urbana “dotación de vivienda protegida”<sup>33</sup>.

Supone un caso de variable con cuatro límites que podemos formular tal como se refleja en la tabla 2.

### b. Indicador de sostenibilidad demográfica “crecimiento poblacional”<sup>34</sup>

Se puede considerar como un caso particular de variable con cuatro límites cuando  $\lim_{s1}[I_i] = \lim_{s2}[I_i]$ .

momento en función del estado de los demás SCA dentro de una misma clase o de otros SCA con los que haya interacción

31 Todas las formulaciones lineales son deducibles –por reducción- de la formulación para variables con cuatro límites o deducibles/inferibles de la formulación para variables con dos límites.

32 Se han elegido indicadores propuestos por autores u organizaciones con suficiente prestigio.

33 Para el análisis utilizamos como base el indicador incluido en AEUB (2010:75). Indicador 49. Viviendas con Protección Oficial

34 Para el análisis utilizamos como base el indicador incluido en Graymore et al., (2010:463); modelo ‘Sustaining Human Carrying Capacity, SHCC’. Indicador Population Growth

### c. Indicador de sostenibilidad urbana “accesibilidad al transporte público”<sup>35</sup>

Se puede considerar un caso de variables con dos límites, que podemos formular como se indica en la tabla 4.

### d. Indicador de sostenibilidad urbana “dotación de zonas verdes”<sup>36</sup>

Es un caso particular de variables con dos límites, para las cuales el  $\lim_{is1}$  es igual a 0, lo que podemos formular como se ilustra en la tabla 5<sup>37</sup>.

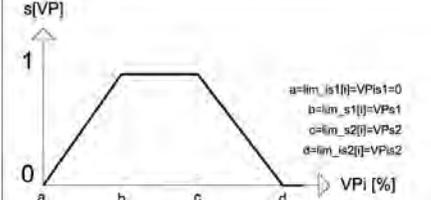
### e. Indicador de consumo de energía per cápita<sup>38</sup>

Es un caso de variable con dos límites y función no lineal.

### f. Indicador de calidad urbana “conectividad de la red”<sup>39</sup>

Se trata de una variable con dos límites, y la peculiaridad de establecer un ‘valor de corte’ inferior<sup>40</sup>.

Tabla 2. Ejemplo indicador de sostenibilidad urbana: dotación de vivienda protegida

Grafica indicador	Formulación indicador
	$s[VP] = \max \left[ \min \left[ \frac{i - \lim_{is1}}{\lim_{s1} i - \lim_{is1}}; 1; \frac{\lim_{is2} i - i}{\lim_{is2} i - \lim_{s2}} \right]; 0 \right]$ <p>Y la fórmula simplificada para el cálculo será la siguiente</p> $VP[\%] = \min \left[ \frac{VP_1}{0,30}; 1; \frac{1,00 - VP_2}{0,40} \right] * 100$
<p>Fuente: Elaboración propia y AEUB [2010] con las siguientes NOTAS:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Los códigos significan lo siguiente:             <ol style="list-style-type: none"> <li>a. VP[i]%_ Indicador Vivienda Protegida</li> <li>b. VPI el porcentaje de vivienda protegida en el área en relación con el total de viviendas</li> </ol> </li> <li>2) Se trata de un indicador para el cual es necesario establecer 4 límites:             <ol style="list-style-type: none"> <li>a. Los límites de Sostenibilidad para Vivienda Protegida ‘VPs’ son 30% y 60%</li> </ol> </li> </ol>	

35 Para el análisis utilizamos como base el indicador incluido en BRE (2012); modelo ‘BREEAM for Communities 2012’. Indicador TM 04. Access to public Transport

36 Para el análisis utilizamos como base el indicador incluido en JSBC (2011); modelo ‘CASBEE for Cities’. Indicador Q2.1.2. Adequate provision of parks and open spaces

37 Existen muchas variables que son caracterizables de esta manera, lo que confiere especial importancia a esta formulación (que además simplifica las formulaciones anteriores).

38 Para el análisis utilizamos como base el indicador incluido en Prescottt Allen (2001: 306); modelo ‘Human Wellbeing Index, HWI’. Indicador Energy Consumption per person

39 Para este análisis hemos formulado un ‘indicador’ que supone una combinación parcial de dos créditos del sistema ‘LEED for Neighbourhood Development’ (USGBC, 2009). Indicador SLL Pr 01: ‘Smart Location and Linkage’ y SLL 01: Preferred Locations’

40 Este tipo de formulación es muy interesante para modelizar indicadores utilizados en procesos de toma de decisiones. Sirve para modelizar los prerrequisitos del sistema LEED ND o los créditos obligatorios del sistema BREEAM.

Tabla 3. Ejemplo indicador de sostenibilidad demográfica: crecimiento poblacional

Grafica indicador	Formulación indicador
	$s[CP] = \max \left[ \min \left[ 1; 1 - \frac{\left[ \frac{i - \lim i}{s2} \right]^{2/7}}{\left[ \frac{\lim i - \lim i}{s} \right]^{2/7}} \right]; 0 \right]$ <p>Y la fórmula simplificada para el cálculo será la siguiente</p> $CP[\%] = \max \left[ \min \left[ 1; 1 - \frac{CP_i^2}{1,10} \right]; 0 \right] * 100$
<p>Fuente: Elaboración propia y GRAYMORE ET AL [2010] con las siguientes NOTAS:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Aunque se trata de una variable con tres límites, la simetría existente en torno a Lim_s, permite modelarlo a partir de una única función, es decir, como si fuera una variable con dos límites.</li> <li>Los autores [GRAYMORE ET AL] lo plantean como una variable discreta, lo que permitiría modelarlo como la intersección de tres funciones de pertenencia difusas. No obstante, se ha formulado una única función que permite resolver todos los tramos proporcionando valores similares y respeta los límites extremos.</li> <li>Los códigos significan lo siguiente:             <ol style="list-style-type: none"> <li>CP[i]%_ Indicador Sostenibilidad del Crecimiento de Población</li> <li>CPi_ crecimiento de población expresado en porcentaje</li> </ol> </li> <li>Se trata de un indicador para el cual es necesario establecer 2 límites:             <ol style="list-style-type: none"> <li>La situación de ‘Sostenibilidad Demográfica’ se produce cuando CPs=0%</li> <li>La situación de ‘Insostenibilidad Demográfica’ se produce cuando se alcanza o supera una desviación CPis≥ ±1,4%</li> </ol> </li> </ol>	

Tabla 4. Ejemplo indicador de sostenibilidad urbana: accesibilidad al transporte público

Grafica indicador	Formulación indicador
	$S[ATP] = \max \left[ \min \left[ \frac{\lim i - i}{i s2}; 1 \right]; 0 \right]$ <p>Y la fórmula simplificada para el cálculo será la siguiente</p> $ATP[I_i]\% = \min \left[ \frac{950 - ATP_i}{600}; 1 \right] * 100$
<p>Fuente: Elaboración propia y BRE [2012] con las siguientes NOTAS:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>El indicador permite calcular la ‘accesibilidad’ de cada edificio, y requiere que posteriormente se calcule la ‘accesibilidad del conjunto’, lo que puede hacerse mediante una media aritmética:             <math display="block">ATP[I]_{\%} = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n ATP[I_i]</math> <p>Opcionalmente se podría añadir una ponderación según el número de ocupantes de cada edificio en relación al total de ‘población’ [residente o flotante] del área</p> </li> <li>Los códigos significan lo siguiente:             <ol style="list-style-type: none"> <li>ATP[i]%_ Indicador Accesibilidad al Transporte del conjunto del Área Urbana</li> <li>ATP[ii]%_ Accesibilidad al Transporte de cada edificio</li> <li>ATPi la distancia desde cada acceso a edificio hasta una parada de transporte público</li> <li>n el número total de edificios en el área urbana evaluada</li> </ol> </li> <li>Se trata de un indicador para el cual es necesario establecer 2 límites:             <ol style="list-style-type: none"> <li>La situación de ‘Accesibilidad Total’ se alcanza si la distancia desde el acceso de cada edificio a una parada de transporte público -Tren, Autobús, Tranvía o Metro- es ‘ATPs2’ inferior a 350 m En entornos rurales, la distancia se incrementa a 700m.</li> <li>La situación de ‘inaccesibilidad total’ se considera cuando la distancia desde el acceso del edificio a una parada de transporte publico supera ‘ATPi2’=950m [calculo propio suponiendo que el valor propuesto por BRE, 2012 -650 m- como distancia ‘aceptable’ equivale a un valor del indicador de 0,5]</li> </ol> </li> <li>Alternativamente, este indicador podría modelarse con cuatro límites, ya que a partir de 15 m2/hab, el incremento de superficie podría no aportar ‘ventajas’, pero si inconvenientes [aumento del coste de mantenimiento, reducción de la compacidad, etc...]</li> </ol>	

Tabla 5. Ejemplo indicador de sostenibilidad urbana: dotación de zonas verdes

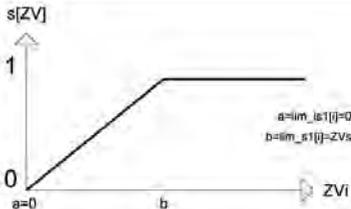
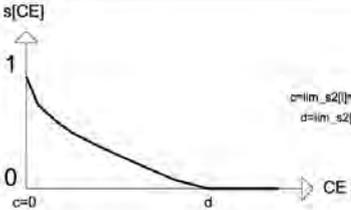
Grafica indicador	Formulación indicador
	$s[ZV] = \max \left[ \min \left[ \frac{i - \lim_{i1} i}{\lim_{s1} i - \lim_{i1} i}; 1 \right]; 0 \right]$ <p>Y la fórmula simplificada para el cálculo será la siguiente</p> $ZV[\%] = \min \left[ \frac{ZVi}{ZVs}; 1 \right] * 100$
<p>Fuente: Elaboración propia y JSBC [2011] con las siguientes NOTAS:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Los códigos significan lo siguiente:                     <ul style="list-style-type: none"> <li>ZV_ Indicador Zonas Verdes</li> <li>ZVi_ Dotación de Zonas Verdes [m2/hab] en el Área Urbana evaluada</li> <li>ZVs_ Objetivo de Sostenibilidad en Dotación de Zonas Verdes</li> </ul> </li> <li>Se trata de un indicador para el cual es necesario establecer 2 límites:                     <ol style="list-style-type: none"> <li>Se establece el 'Objetivo de Sostenibilidad' 'ZVs1' en alcanzar los 13m2/hab [JSBC, 2011] que se sitúa en un punto intermedio entre los 10 y 15 m2 de zona verde por habitante recomendados por la OMS.</li> <li>El 'Límite de Insostenibilidad' se establece en la no existencia de zonas verdes 'ZVi1'=0 [de los datos indicados en el indicador utilizado como base, parece deducirse como límite ZVi1 el valor 2m2/hab. No obstante, dada la escasa diferencia, se prefiere el 0 que resulta más intuitivo].</li> </ol> </li> <li>Alternativamente, este indicador podría modelarse con cuatro límites, ya que a partir de 15 m2/hab, el incremento de superficie podría no aportar 'ventajas', pero si inconvenientes [aumento del coste de mantenimiento, reducción de la compacidad, etc...].</li> </ol>	

Tabla 6. Ejemplo indicador de sostenibilidad urbana: consumo de energía

Grafica indicador	Formulación indicador
	$s[CE] = \max \left[ \min \left[ 1; 1 - \frac{\left[ \frac{i - \lim_{s2} i}{\lim_{i2} i - \lim_{s2} i} \right]^{1/2}}{\left[ \frac{\lim_{i2} i - \lim_{i2} i}{\lim_{i2} i - \lim_{s2} i} \right]^{1/2}} \right]; 0 \right]$ <p>Y la fórmula simplificada para el cálculo será la siguiente</p> $CE[\%] = \max \left[ \min \left[ 1; 1 - \frac{CE_i^{1/2}}{640^{1/2}} \right]; 0 \right] * 100$
<p>Fuente: Elaboración propia y PRESCOTT-ALLEN [2001] con las siguientes NOTAS:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Los códigos significan lo siguiente:                     <ul style="list-style-type: none"> <li>CE_ Indicador Sostenibilidad en el Consumo de Energía</li> <li>CEi el consumo de energía anual per cápita en Giga Julios</li> </ul> </li> <li>Se trata de un indicador para el cual es necesario establecer 2 límites:                     <ol style="list-style-type: none"> <li>Se establece el 'Objetivo de Sostenibilidad' 'CEs2' es 0 GJ.Hab-1Año-1.</li> <li>Se establece el 'límite de insostenibilidad' 'CEs2' es 640 GJ.Hab-1Año-1</li> </ol> </li> <li>El indicador propuesto por PRESCOTT ALLEN define cinco intervalos de 'sostenibilidad' en función del consumo de energía, lo que se puede modelizar como la intersección de cinco funciones de pertenencia. No obstante, se ha preferido definir una formulación que lo resuelve con una única función, aunque presente 'ligeras' diferencias con los valores propuestos por el autor original.</li> </ol>	

#### 4.4. Evaluación de índices y paneles de indicadores

Hasta ahora hemos revisado las aportaciones que este enfoque nos proporciona para la formulación de indicadores individuales de sostenibilidad, pero además nos proporciona otra cuestión de gran importancia; nos permite evaluar la calidad global de índices y conjuntos de indicadores desde dos perspectivas: coherencia y completitud.

La COHERENCIA se referirá a la no contradicción interna, es decir, que tanto el índice como todos sus indicadores parciales deberán estar definidos [formulados] en relación a los mismos conceptos complementarios: sostenibilidad e insostenibilidad<sup>41</sup>.

<sup>41</sup> Aunque esta condición parece 'evidente', la revisión de numerosos índices existentes ha mostrado que son muy pocos los ejemplos que la cumplen totalmente.

La COMPLETITUD se referirá a que un índice deberá incluir todas las variables relevantes en relación con dichos conceptos complementarios, es decir, todas aquellas variables que pueden modificar la pertenencia global del sistema a cada uno de los dos conjuntos complementarios<sup>42</sup>.

## 5. Conclusiones

La Teoría de conjuntos difusos nos proporciona un marco conceptual que nos permite simplificar y clarificar la formulación matemática de indicadores de sostenibilidad:

- Nos proporciona un criterio para determinar las variables relevantes para la sostenibilidad de un sistema.
- Nos permite modelizar la sostenibilidad de dicho sistema mediante la formulación de las funciones de pertenencia para cada una de dichas variables.

Pero además, la revisión de la sostenibilidad desde la Teoría de Conjuntos nos proporciona dos elementos adicionales:

- Criterios para revisar la validez (coherencia y completitud) de índices y paneles de indicadores.
- La definición simplificada de perspectivas parciales:
  - a) Sostenibilidad de una ciudad, como el grado de pertenencia de dicha ciudad al conjunto de las ciudades sostenibles.
  - b) Sostenibilidad de una sociedad, como el grado de pertenencia de dicha sociedad al conjunto de sociedades sostenibles.

Dado que para caracterizar un conjunto necesitaremos describir las cualidades que deben poseer sus elementos para pertenecer a dicho conjunto, la resolución conceptual vendrá en gran medida de la resolución del conjunto complementario (término opuesto)...

...si es posible definir las cualidades que hacen a un sistema no-sostenible dentro de los de su clase, entonces podemos –por oposición– determinar las cualidades que lo harán sostenible que serán las “contrarias” [o complementarias]

Esto es muy importante, porque este acercamiento nos va a permitir solucionar en gran medida el debate acerca del oxímoron “desarrollo sostenible”<sup>43</sup>.

---

42 La ‘completitud’ puede no ser necesaria en determinadas ocasiones, sin embargo, en el caso de excluir ‘variables’ deberá ser justificadamente.

43 Por ejemplo, a partir del análisis de ciudades/sociedades ‘desaparecidas’ podemos deducir variables relevantes y sus límites de insostenibilidad; el análisis de la historia permite hacer esta revisión desde bases científicas y superar el debate de ‘¿Qué es ‘desarrollo sostenible’?’, haciendo innecesaria la ‘definición lingüística precisa’.

Por otra parte, el análisis de los SCA que hemos propuesto nos va a proporcionar una serie de indicadores parciales de sostenibilidad<sup>44</sup>, haciendo necesaria la siguiente pregunta:

¿Será posible, a partir de dichos indicadores, obtener un valor global de la sostenibilidad del sistema?

La respuesta es que sí...

...existirá una función a la que llamaremos  $f_0$ , que permitirá transformar las diferentes funciones parciales de pertenencia de  $I$  a  $S$ , en una única función de pertenencia global, a la cual llamaremos 'grado de sostenibilidad' del sistema  $I$

Esto lo podremos enunciar como que existe  $f_0$  tal que

$$\exists f_0: S_T[I]_{\%} = f_s[I] = f_0[f_s[I_1], f_s[I_2], \dots, f_s[I_n]] \quad [19]$$

Desarrollar la formulación  $f_0$  ha sido el objeto de una Teoría Matemática de la Sostenibilidad, recientemente terminada, y cuya extensión es imposible resumir en este trabajo, pero que se publicará en breve plazo de tiempo.

### Referencias:

AEUB (2010) Sistema de indicadores y condicionantes para ciudades grandes y medianas. Agencia de Ecología Urbana de Barcelona.

Alvira, R. (2011) Métodos de certificación de la sostenibilidad en proyectos urbanos. Cuadernos de Investigación Urbanística, Núm. 71. Departamento de Urbanística y Ordenación del Territorio. ETS Arquitectura. Universidad Politécnica de Madrid.

Alvira, R. (2013) Una Teoría Matemática de la Sostenibilidad y el Desarrollo Sostenible. Tesis Doctoral (pendiente lectura). Departamento de Urbanística y Ordenación del Territorio, ETS Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid

Boole, G. (1854) An Investigation of The Laws of Thought, on which are Founded the Mathematical Theories of Logic and Probabilities

BRE (2012). BREEAM Communities. SD202. Technical Manual

Graymore, M. Sipe, N. & Rickson, R. (2010) Sustaining Human Carrying Capacity: A tool for regional sustainability assessment. Ecological Economics 69 (2010) 459–468

<sup>44</sup> Ya hemos dicho que estas funciones de pertenencia se pueden interpretar como 'indicadores de sostenibilidad' del Sistema  $I$  en relación con cada una de sus variables relevantes.

Hacking, I. (1995) El surgimiento de la probabilidad. Un Estudio Filosófico de las Ideas tempranas acerca de la Probabilidad, la Inducción y la Inferencia. Ed. Gedisa

Ivorra, C. (2010) Lógica y Teoría De Conjuntos

JSBC (2011) CASBEE for Cities. Technical Manual 2011. The Committee For The Development of an Environmental Performance Assessment Tool for Cities. Japan Sustainable Building Consortium

Oporto, S. (2005) Introducción a la Lógica Difusa. Conjuntos Difusos y Conjuntos Clásicos

Prescott-Allen, R. (2001) The Wellbeing of Nations A Country-by-Country Index of Quality of Life and the Environment

Röckstrom, J. et al.(2009). A Safe Operating Space for Humanity. Nature, vol. 461, no 7263, p. 47275.

USGBC (2009) LEED for Neighborhood Development. Rating System

Zadeh, L. (1965) Fuzzy Sets. Information and Control, 8, 338-353 (1965)