

# HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA LA EVALUACIÓN POST-SÍSMICA DE DAÑOS EN EDIFICIOS<sup>1</sup>

Martha Liliana Carreño T.<sup>2</sup>, Omar Darío Cardona A.<sup>3</sup>, Mabel Cristina Marulanda F.<sup>4</sup> y Alex H. Barbat<sup>5</sup>

**Resumen:** En este artículo se desarrolla un método y una herramienta computacional orientada a apoyar la evaluación de daños y de la seguridad de los edificios después de sismos fuertes. Los datos de entrada del programa de computador corresponden a información subjetiva e incompleta del estado del edificio, obtenida por profesionales posiblemente inexpertos en el campo de la construcción. Los niveles de daño de los componentes estructurales normalmente son descritos por calificaciones lingüísticas que pueden ser adecuadamente procesadas con técnicas de inteligencia computacional basadas en sistemas neuro-difusos. Estas técnicas facilitan la realización de las complejas y urgentes tareas de toma de decisiones de los ingenieros en relación con la ocupación de los edificios después de un desastre sísmico. El sistema híbrido neuro-difuso, descrito en este artículo, está basado en una red neuronal de tres capas artificiales unidireccionales especiales y una base de reglas de lógica difusa. Este sistema es una herramienta de especial utilidad durante la fase de respuesta a emergencias, que facilita las decisiones de habitabilidad y reparabilidad de los edificios. Para ilustrar su aplicación se incluyen ejemplos de aplicación del programa para tres clases diferentes de edificios.

**Palabras clave:** evaluación de la seguridad, evaluación post sísmica, habitabilidad de edificios, nivel de daño, red neuronal artificial, reparabilidad, sistema neuro-difuso, toma de decisiones.

## COMPUTATIONAL TOOL FOR POST-EARTHQUAKE EVALUATION OF DAMAGE IN BUILDINGS

**Abstract:** A method and a computational tool oriented to assist the damage and safety evaluation of buildings after strong earthquakes are developed in this article. The input of the computer program is the subjective and incomplete information on the building state obtained by inspectors which are possibly not expert professionals in the construction field. The damage levels of the structural components are usually described by linguistic qualifications which can be adequately processed by computational intelligence techniques based on neuro-fuzzy systems that facilitate the complex and urgent processes of engineering decision-making on the building occupancy after a seismic disaster. The hybrid neuro-fuzzy system used in this article is based on a special three-layer feedforward artificial neural network and a base of fuzzy logic rules. It is an effective tool during the emergency response phase providing decisions about the habitability and repairability of the buildings. Examples of application of the computer program are given for three different building classes.

**Keywords:** artificial neural network, building habitability, damage level, decision making, neuro-fuzzy system, post earthquake evaluation, repairability, safety evaluation.

---

<sup>1</sup> Artículo recibido el 3 de noviembre de 2006, y aceptado para publicación el 14 de diciembre de 2006.

<sup>2</sup> Universidad Politécnica de Cataluña, C/ Jordi Girona 1-3 Módulo C1, Barcelona, España. Teléfono: (+34) 934016485, Fax: (+34) 934011048. E-mail: [liliana@cimne.upc.edu](mailto:liliana@cimne.upc.edu)

<sup>3</sup> Universidad Nacional de Colombia, Carrera 27 No 64-60, Manizales, Colombia. Teléfono: (+57 1) 5300828, Fax: (+57 1) 5300827. E-mail: [odcardonaa@unal.edu.co](mailto:odcardonaa@unal.edu.co)

<sup>4</sup> Universidad Politécnica de Cataluña, C/ Jordi Girona 1-3 Módulo C1, Barcelona, España. Teléfono: (+34) 934016485, Fax: (+34) 934011048. E-mail: [mmarulan@cimne.upc.edu](mailto:mmarulan@cimne.upc.edu)

<sup>5</sup> Universidad Politécnica de Cataluña, C/ Jordi Girona 1-3 Módulo C1, Barcelona, España. Teléfono: (+34) 934016485, Fax: (+34) 934011048. E-mail: [alex.barbat@upc.edu](mailto:alex.barbat@upc.edu)

## INTRODUCCIÓN

El criterio actual del diseño, basado en ductilidad y redundancia estructural, tiene como objeto proveer en los edificios la suficiente resistencia para evitar el colapso pero no para evitar que se presenten daños. Por lo tanto, los códigos sísmicos aceptan que se presente daño severo sin colapso en los edificios en caso de sismos fuertes. Ahora bien, en muchas zonas sísmicas se han construido innumerables edificios de acuerdo con códigos sísmicos obsoletos o sin ningún tipo de provisión sismorresistente. Como consecuencia, muchos edificios pueden presentar diferentes grados de daño durante terremotos fuertes y en muchos casos su seguridad puede llegar a ser dudosa. Para la obtención de un rápido diagnóstico del estado de un edificio después de un terremoto, que proporcione información confiable de su habitabilidad y reparabilidad, es necesario tener en cuenta no sólo los diferentes niveles de daño en los elementos estructurales, sino también su estabilidad estructural. Por lo tanto, es necesario llevar un proceso preciso de evaluación de los daños que implica la participación de profesionales expertos en el campo de las estructuras y la mecánica de suelos, la evaluación de daños y la rehabilitación de edificios.

Para llevar a cabo un buen proceso de evaluación de daños, es importante contar con evaluadores con amplia experiencia y experticia. Sin embargo, cuando ocurre un evento sísmico de gran magnitud, los daños en la zona pueden ser tan generalizados que no es posible que los expertos se encarguen de hacer la totalidad de las evaluaciones. Este problema hace necesario que gran parte de estas evaluaciones sean realizadas por profesionales con poca o ninguna experiencia, que posiblemente no están familiarizados con daños causados por movimientos sísmicos. Debido a esto, es común que se tienda a sobreestimar o subestimar el daño existente, permitiendo la ocupación peligrosa o la demolición innecesaria de edificios. Adicionalmente, la información obtenida con los métodos de evaluación de daños es altamente subjetiva, dado que los niveles de daño están definidos con calificaciones lingüísticas como *leve*, *menor*, *moderado*, *medio*, *severo*, *etc.*, que tienen una variación considerable en su significado dependiendo de la persona y la experiencia de quien los utilice.

La inteligencia computacional puede ser utilizada para superar este tipo de dificultades que se presentan en el proceso de la evaluación de daños. Las redes neuronales han sido usadas para afrontar problemas complejos, simulando la función del sistema nervioso, imitando los mecanismos adaptativos y cognitivos del aprendizaje humano. La lógica difusa es una técnica innovadora que permite representar la información cualitativa o subjetiva en forma numérica y es muy útil para las aplicaciones tecnológicas e ingenieriles donde los criterios de los expertos son requeridos. Refiriéndose a la evaluación del riesgo, Carreño, Cardona y Barbat (2004) y Cardona (2005), aplicaron las técnicas de la inteligencia computacional para hacer evaluaciones del riesgo sísmico urbano antes y después de los terremotos (evaluaciones *ex - ante* y *ex - post*) y para medir el desempeño y la efectividad de la gestión de riesgos de desastres a nivel nacional, subnacional y local. Considerando estas características y la aplicación de las técnicas de inteligencia computacional y la necesidad de toma de decisiones para determinar la habitabilidad y reparabilidad de los edificios afectados después de un desastre sísmico, se diseñó un sistema experto para la evaluación post-sísmica del daño y la seguridad de edificios, usando un modelo Kohonen, un algoritmo neuro-difuso de aprendizaje no supervisado, para evitar los errores usualmente cometidos por evaluadores inexpertos cuando manejan información subjetiva e incompleta. Este modelo considera la posibilidad de daños en elementos estructurales y arquitectónicos y los efectos sísmicos potenciales de sitio. También tiene en cuenta las condiciones pre-existentes que incrementan la vulnerabilidad del edificio, tales como la mala calidad de los materiales de construcción.

## EVALUACIÓN POST SÍSMICA DEL DAÑO EN EDIFICIOS

La toma de decisiones de la habitabilidad y reparabilidad de edificios basada en los complejos patrones del daño observado es realmente una tarea difícil para profesionales inexpertos. Por ejemplo, durante sismos fuertes, en los edificios de columnas de concreto reforzado aparecen grietas diagonales a causa del cortante o la torsión mientras que las grietas verticales, el desprendimiento y aplastamiento del concreto y el pandeo de las barras longitudinales de refuerzo se deben usualmente a la flexo-compresión. Los daños más comunes en vigas son las fisuras diagonales y la falla de los estribos debido a cortante o torsión, así como también grietas verticales, falla longitudinal del refuerzo y aplastamiento del concreto debido a la flexión ocasionada por las cargas alternantes. Las uniones viga-columna usualmente presentan grietas diagonales como resultado de los esfuerzos cortantes y su falla se debe comúnmente a la falta de anclaje del refuerzo longitudinal de las vigas en el nudo o debido a la flexión excesiva. Las losas pueden presentar fisuras de corte alrededor de las columnas y grietas longitudinales debidas a la flexión excesiva. El daño de los elementos no estructurales representa una gran fracción del daño total causado por un terremoto. Esto ocurre normalmente debido a falta de conexiones apropiadas entre los tabiques, instalaciones u otros componentes no estructurales y la estructura. También se puede producir por la flexibilidad excesiva de las estructuras, lo que se traduce en una deriva excesiva entre los pisos. Las grietas diagonales son comunes en las divisiones y en las fachadas de mampostería.

Cuando se evalúa el daño estructural y no estructural de los edificios, es común que los evaluadores sin entrenamiento y calificación tiendan a agravar o subestimar el nivel de daño observado. Por esta razón, los profesionales inexpertos deben utilizar guías apropiadas y ser supervisados por evaluadores expertos, con el objetivo de tomar decisiones correctas acerca del estado de los edificios. Esta es la razón por la cual en diferentes países con alta actividad sísmica se han hecho esfuerzos para desarrollar metodologías y guías de evaluación de daños, con el objetivo de ayudar en la definición de medidas apropiadas de reparación de los edificios dañados y para evitar demoliciones innecesarias. Estas guías permiten decidir rápidamente si un edificio puede continuar siendo utilizado o no, e identificar los edificios que pueden utilizarse con seguridad como refugios temporales para las personas evacuadas. Pero aún así, uno de los defectos de este tipo de procesos de evaluación de daños es su alta subjetividad, debido a que los niveles de daño son definidos con calificaciones lingüísticas como leve, moderado o severo, lo que puede tener diferentes significados de acuerdo con el criterio de cada persona. La mala calidad de los datos y la falta de sistematización, además, contribuyen a la confusión y al retraso de decisiones relevantes en el manejo del desastre. Por lo tanto, es necesario llevar a cabo un plan de contingencia en el cual el proceso de evaluación de daños sea una de sus principales tareas.

Las opiniones de los evaluadores acerca de los daños y de la seguridad estructural son esenciales para mejorar la efectividad de los códigos de construcción sismorresistente mediante la identificación del tipo de fallas de diferentes sistemas estructurales. Algunos ejemplos de guías sistemáticas y procedimientos para evaluar el daño de edificios que se han desarrollado en varios países se indican a continuación (Carreño *et al.* 2005; 2006):

- **República (antes Yugoeslava) de Macedonia.** El Instituto de Ingeniería Sísmica y Sismología (IZIIS) de la Universidad *Kiril y Metodij* desarrolló una de las primeras metodologías para la evaluación post-sísmica de daños. Sus principales objetivos fueron la reducción de pérdidas humanas en edificios con baja resistencia o en edificios afectados que podrían ser destruidos por réplicas, la recolección de datos relacionados con la magnitud de un desastre en términos de viviendas disponibles, edificios destruidos y edificios inseguros; recolección de datos para protección civil y planes de rescate y de organización institucional después de terremotos; y mejoramiento de las especificaciones de diseño de los códigos de construcción sismorresistente. Esta metodología y procedimiento fue traducida al español y utilizada después del terremoto de México de 1985.
- **Estados Unidos - California.** El Consejo de Tecnología Aplicada (ATC por sus siglas en inglés) propuso el *Procedimiento de la evaluación post-sísmica de la seguridad de edificios* con tres etapas. La primera etapa es una evaluación rápida, donde se decide si un edificio es obviamente inseguro o aparentemente habitable. Estas evaluaciones frecuentemente son superficiales dado que no hay suficiente personal disponible para realizar inspecciones más profundas. El segundo paso corresponde a una evaluación detallada, donde los edificios obviamente inseguros son evaluados visualmente por un ingeniero estructural. La tercera etapa es la evaluación de ingeniería que se realiza para edificios cuestionables y severamente dañados que tienen que ser rehabilitados. Una segunda versión del procedimiento se publicó en 1995 denominada “*Adendo al ATC 20: Procedimientos de evaluación post-sísmica de la seguridad de edificios*” (ATC 20-2). En 2003 se desarrolló un sistema para la recolección de datos en la evaluación de daños, ATC 20i (ATC-20i, 2003) y en 2005 se publicó la segunda edición de la ATC 20-1 “Manual de campo: Evaluación de la seguridad post-sísmica de edificios”, (ATC-20-1, 2005).
- **Japón.** Después del terremoto de Miyagiken – Oki en 1978, se vio la necesidad de implementar una metodología apropiada para la inspección de edificios después de un sismo. Por consiguiente se publicaron y se revisaron en 1989 las *Guías para inspección de daños después de un sismo y técnicas de restauración*. La metodología fue probada después del terremoto de Nihonkai-Chumbu en 1983 y después del terremoto de México en 1985, revisada en 1989 y publicada por la Asociación Japonesa de Prevención de Desastres en Edificios (CENAPRED, 1996). Mediante esta metodología, los edificios que tienen que ser evaluados son seleccionados por una inspección general después del terremoto. La evaluación consiste en dos etapas: una evaluación visual inmediata del nivel de riesgo o habitabilidad y una evaluación del daño estructural y su clasificación. Como resultado de este proceso, se hace una sugerencia al propietario, relacionada con la necesidad de rehabilitación estructural (reparación, refuerzo o demolición).
- **México.** El Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) desarrolló el *Manual de evaluación post-sísmica de la seguridad estructural de edificaciones* (Rodríguez y Castrillón, 1995). Esta metodología se revisó y publicó por la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica (SMIS) y el gobierno de Ciudad de México en 1998 (SMIS, 1998). En este método

se proponen tres niveles de evaluación: una evaluación rápida, una evaluación detallada y una evaluación especializada hecha por una oficina de ingeniería. El objetivo principal de la primera fase de evaluación es dictaminar si los edificios que soportaron un sismo pueden mantener su uso o si su uso debe ser restringido o prohibido. Con esta información se intenta estimar la magnitud del desastre, identificando las características generales de los daños, lo que puede influir en mejoras o cambios en los reglamentos de construcción vigentes.

- **Italia.** Después del terremoto de Friuli (1976) se desarrolló un procedimiento de evaluación de daños para la estimación de las pérdidas económicas. Las guías y formatos fueron publicadas en el año 2000. Más recientemente, se publicó una propuesta de Goretti (2001) basada en un programa de investigación iniciado en 1995 dirigido a introducir los niveles de habitabilidad y de inspección de daños. Adicionalmente se ha desarrollado una herramienta multimedia denominada MEDEA (Manuale di Esercitazioni sul Danno Ed Agibilità) (Papa y Zuccaro, 2003; Zuccaro y Papa, 2002), que contiene un catálogo de los principales daños en elementos estructurales y no estructurales de edificios en mampostería, que ayuda a la clasificación de estos daños por su interpretación como posibles mecanismos de colapso.
- **Colombia.** Después del terremoto de la zona Cafetera en 1999, los estudios realizados en vulnerabilidad sísmica de edificios permitieron desarrollar una metodología basada en un sistema neuro-difuso para la evaluación de la habitabilidad y reparabilidad de edificios en caso de terremotos. La metodología fue oficialmente adoptada por las ciudades de Bogotá y Manizales (AIS 2002; 2003). Ésta incluye un formulario único y una guía de campo diseñada para evaluar el daño de manera específica de cada uno de los edificios afectados, con el objetivo principal de determinar la seguridad de las construcciones, identificar aquellas que son obviamente peligrosas, las que presentan alguna restricción de habitabilidad o las que pueden ser utilizadas sin ninguna restricción (AIS, 2004).

Otros trabajos están relacionados con la identificación de edificios afectados en áreas de desastre usando imágenes satelitales. Uno de ellos es el método propuesto por Matsuoka y Yamazaki (2004) que usa un satélite SAR (Radar de Apertura Sintética) para identificar la distribución de los edificios afectados en el área después de un desastre, mediante la comparación de imágenes pre y post evento. Esta herramienta ayuda a detectar la extensión y magnitud de los desastres y es útil para las actividades relacionadas con el manejo de desastres.

## MODELO DE EVALUACIÓN DEL DAÑO SÍSMICO

A pesar de las ventajas de las metodologías y de los manuales para la evaluación del daño en edificios comentadas en la sección anterior, las decisiones erróneas, como la demolición de edificios no críticos o la evacuación innecesaria de edificios, siguen cometándose debido a la falta de experiencia y calificación de los evaluadores. Esto representa serios problemas, especialmente en el caso de edificios esenciales. Además, es posible que los daños en edificios que pueden poner en riesgo la estabilidad estructural sean ignorados, poniendo en peligro la vida de los ocupantes. Para enfrentar este problema, se ha desarrollado un sistema experto y una herramienta computacional para la fase de respuesta a emergencias cuando se presenta un fuerte terremoto (Carreño et al., 2003; 2006).

El sistema experto propuesto para la evaluación del daño sísmico de edificios, como soporte para la evaluación de la habitabilidad, está basada en redes neuronales artificiales y conjuntos difusos. Los autores han trabajado en este modelo desde el año 2000 y, aunque esta herramienta aún no ha sido probada en una emergencia sísmica real, ha sido adoptado recientemente por las administraciones de las ciudades de Bogotá y Manizales, en Colombia, para enfrentar futuros sismos y complementar su calibración. El modelo utiliza un enfoque de lógica difusa requerido para procesar la información disponible, que en estos casos además de ser subjetiva, dado que está basada en calificaciones lingüísticas de los daños, puede ser información incompleta. Es por esto que la utilización de este sistema puede ser de gran utilidad para la evaluación de los daños por parte de personas sin experiencia.

Para evaluar el estado global de un edificio desde el punto de vista sísmico se tienen en cuenta tres aspectos que tienen que ver con la seguridad del edificio: *los elementos estructurales*, *los elementos no estructurales* y *las condiciones del suelo*. Otro aspecto que se tiene en cuenta, ya que son características útiles para evaluar la reparabilidad del edificio, son las *condiciones pre-existentes*, relacionadas con la calidad de los materiales de construcción, las irregularidades horizontales y verticales del edificio y su configuración estructural.

El modelo propuesto y la herramienta computacional utilizan una red neuronal artificial (RNA). En el Apéndice A se hace una descripción detallada del uso de la RNA. La red neuronal está compuesta por tres capas (la Figura 1

muestra su estructura general). En la capa de entrada las neuronas están agrupadas en cuatro grupos, correspondientes a los elementos estructurales (ES), elementos no estructurales (NE), condiciones del suelo (CS) y condiciones preexistentes (CP). Cada grupo contribuye con información a una neurona en la capa intermedia en la que sólo hay cuatro neuronas correspondientes a los cuatro grupos. El número de neuronas en la capa de entrada del modelo no es constante. Este depende del sistema estructural que se evalúa y la importancia que se le da a cada grupo de variables, por ejemplo, si el daño estructural es muy alto, no es necesario evaluar las condiciones del suelo o las condiciones preexistentes.

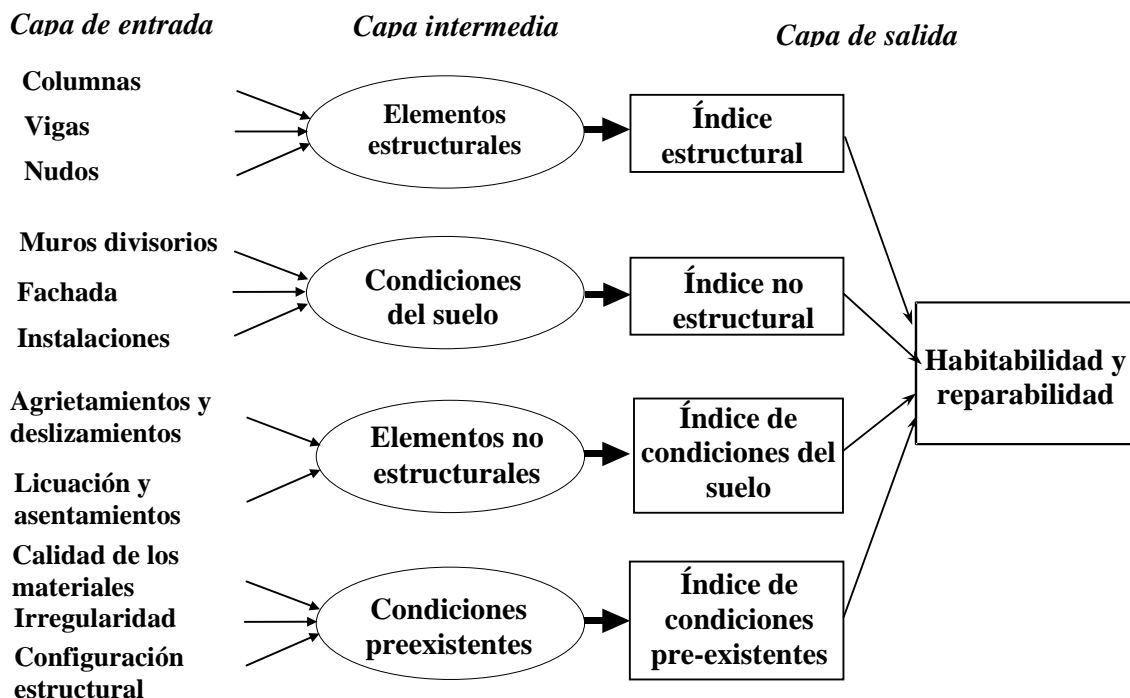


Figura 1: Estructura de la red neuronal.

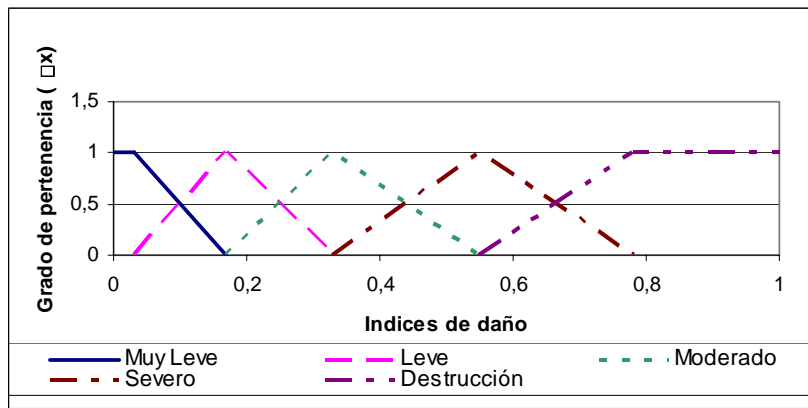
El número de neuronas de entrada para analizar el estado de los elementos estructurales cambia de acuerdo con la clase de edificio. La Tabla 1 muestra las variables estructurales consideradas de acuerdo con el sistema estructural.

Tabla 1: Elementos estructurales de acuerdo con el sistema estructural.

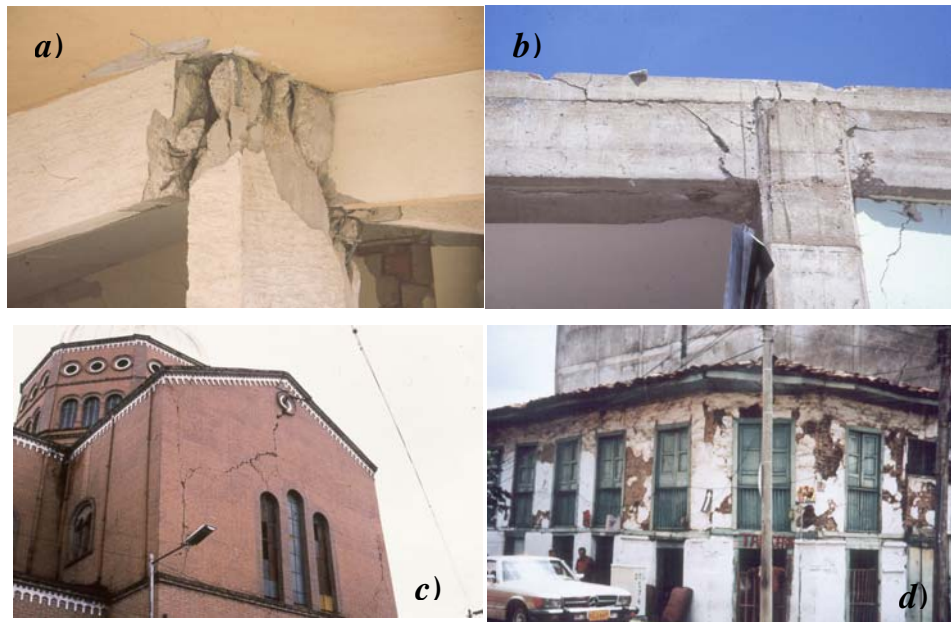
Sistema estructural	Elementos estructurales
Pórticos en concreto reforzado o (con) muros de cortante	Columnas/muros, vigas, nudos y losas
Pórticos en acero o madera	Columnas, vigas, conexiones y losas
Mampostería no reforzada/reforzada/confinada	Muros de carga y losas
Muros de tapia o bahareque	Muros de carga y losas

Se asigna una calificación a los elementos estructurales y no estructurales, dependiendo del daño observado utilizando cinco posibles niveles de daño, representados mediante conjuntos difusos: *ninguno* (*N*), *leve* (*L*), *moderado* (*M*), *fuerte* (*F*) y *severo* (*S*). La Figura 2 ilustra las funciones de pertenencia utilizadas por el modelo para estas calificaciones. Las funciones de pertenencia de los conjuntos difusos alcanzan su punto máximo de pertenencia para los valores de los índices de daño. Los niveles de daño en los diferentes elementos estructurales y no estructurales de edificios con diferentes tipologías están ilustrados en las Figuras 3 y 4, respectivamente.

El daño en los elementos no estructurales no afecta la estabilidad de los edificios, pero puede poner en peligro la seguridad de los ocupantes. Estos elementos no estructurales están clasificados en dos grupos: elementos cuya evaluación es obligatoria y elementos cuya evaluación es opcional (véase la Tabla 2).



**Figura 2: Funciones de pertenencia para las calificaciones lingüísticas.**



**Figura 3: Daño en elementos estructurales: a) Daño severo en un nudo de hormigón armado; b) Daño moderado en una viga de hormigón armado; c) Daño fuerte en un muro de mampostería; d) Daño fuerte en un muro de bahareque.**



**Figura 4: Daño en elementos no estructurales: a) Daño severo en muros divisorios, b) Daño fuerte en escaleras.**

Las variables de condiciones del suelo y pre-existentes son valoradas durante el proceso de evaluación. Las calificaciones lingüísticas utilizadas son: *muy buena (MB)*, *media (M)*, y *muy mala (MM)*. En las condiciones del suelo se tienen en cuenta todas las variables que pueden afectar la estabilidad de la estructura, como deslizamientos y asentamientos del suelo (se pueden observar ejemplos de estas situaciones en la Figura 5). Las condiciones preexistentes pueden presentar características que incrementarían la



vulnerabilidad del edificio ante un sismo. En la figura 6 se presentan algunos ejemplos de malas condiciones preexistentes.

**Tabla 2: Elementos no estructurales.**

Elementos de evaluación obligatoria	Muros divisorios
	Fachada
	Escaleras
Elementos de evaluación opcional	Cielorrasos
	Instalaciones
	Cubierta
	Tanques elevados

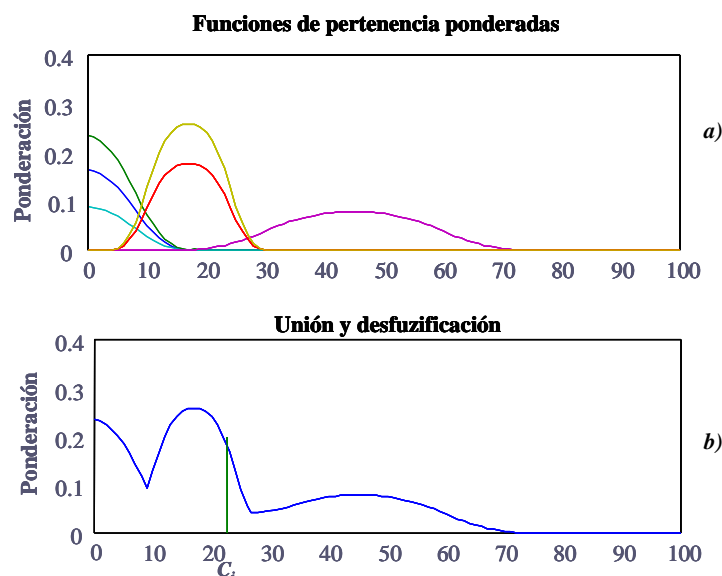


**Figura 5: Condiciones del suelo: a) Licuación del suelo; b) Deslizamientos del suelo.**



**Figura 6: Condiciones preexistentes: a) Mala calidad en la construcción; b) Irregularidades verticales, piso blando; c) Irregularidades en planta; d) Mala configuración estructural: algunos elementos están fuera de los ejes principales.**

En la capa intermedia se obtiene un índice, por *desfuzificación*, de cada grupo de variables. La *desfuzificación* significa que los valores de estos índices corresponden al centroide de área de las funciones de pertenencia relacionadas con cada nivel de daño. La Figura 7 muestra un ejemplo del proceso de *desfuzificación*. Teniendo en cuenta los cuatro índices obtenidos, es posible definir en la capa de salida el daño en el edificio, utilizando las reglas difusas con evaluaciones de los elementos estructurales y no estructurales. El concepto de variable lingüística es un paso previo al concepto de reglas difusas SI-ENTONCES. El cálculo de las reglas difusas se refiere a la parte de la lógica difusa más frecuentemente utilizada en aplicaciones prácticas (Zadeh, 1975; Rutkowska, 2002; Zadeh, 1996). El concepto de regla difusa es importante cuando las dependencias son imprecisas o cuando no se requiere un algo grado de precisión (Rutkowska, 2002). Una base de reglas difusas consiste de una colección de reglas difusas del tipo SI-ENTONCES.



**Figura 7: Evaluación del nivel de daño de elementos estructurales: a) Conjuntos difusos; b) Envoltente de la unión de los conjuntos difusos. El punto  $C_i$ , correspondiente al centroide del área limitada por la envoltente, es el valor desfuzificado.**

De acuerdo con las reglas difusas propuestas, la habitabilidad de un edificio se decide con base en el nivel de daño de los elementos estructurales y no estructurales como de la evaluación de las condiciones del suelo. Usando las condiciones pre-existentes, el sistema define un nivel de reparabilidad del edificio proporcionando recomendaciones de habitabilidad y reparabilidad después de un sismo. Como resultado se obtiene por ejemplo: “habitabile después de reparaciones menores” o “acceso restringido: habitable después de reparaciones” o “inseguro: habitable después de reforzamiento o fortalecimiento estructural” o “peligroso: posible demolición o rehabilitación total del edificio”, son decisiones realizadas por el programa.

La red neuronal se calibró utilizando las evaluaciones del daño por sismo realizadas después del terremoto del Quindío en Colombia en 1999 (véase el Apéndice A). Sin embargo, se necesita mayor información para completar el entrenamiento de la red para otros tipos estructurales, especialmente para pórticos de madera y acero, pues este tipo de sistemas estructurales no eran comunes en la zona afectada por el sismo. Los pórticos de concreto reforzado con muros de cortante también son muy pocos y por lo tanto, el número de evaluaciones de edificaciones para calibrar este sistema estructural fue insuficiente.

**Tabla 3: Tabla comparativa de los índices de daño.**

Nivel de daño	Park, Ang & Wen	Sánchez-Silva y García	Propuestos
Muy leve	< 0.10 0.07	0.10	0.07
Leve	0.10 – 0.25 0.175	0.20	0.17
Moderado	0.25 – 0.40 0.325	0.35	0.33
Severo	0.40 – 0.80 0.6	0.60	0.55
Destrucción	>0.80 0.8	0.90	0.76

La calibración se realiza con la definición de las funciones de daño en relación con la matriz de índices de daño. Para la determinación de estos índices iniciales se consideraron los propuestos en el ATC-13 (1985), las curvas de fragilidad usadas en HAZUS-99 promovidas por FEMA (1999), los índices de Park *et al.* (1984), de Sánchez-Silva y García (2001). Así mismo, se consideraron índices de daño basados en criterios estructurales de disipación de energía (Barbat *et al.*, 1997; 1998; Hanganu *et al.*, 2002; Oller y Barbat, 2006). La Tabla 3 presenta una comparación entre los índices aquí propuestos y los propuestos por Park *et al.* (1984) y Sánchez-Silva y García (2001). Los índices de Park *et al.* (1984) se escogieron como valores



iniciales debido a que han sido calibrados con estudios tanto experimentales como numéricos y son los que cuentan con mayor aceptación. Sus autores consideran que el colapso ocurre para un valor igual a 0.8, aunque Stone y Taylor (1993) plantearon que el colapso se podría esperar a partir de 0.77. De acuerdo a este planteamiento, en este estudio se ha acordado utilizar un valor de 0.76 para el índice correspondiente al colapso o destrucción estructural. En la elección de los índices de daño para diferentes niveles de daño se ha intentado ser conservador, dadas las controversias que se han presentado.

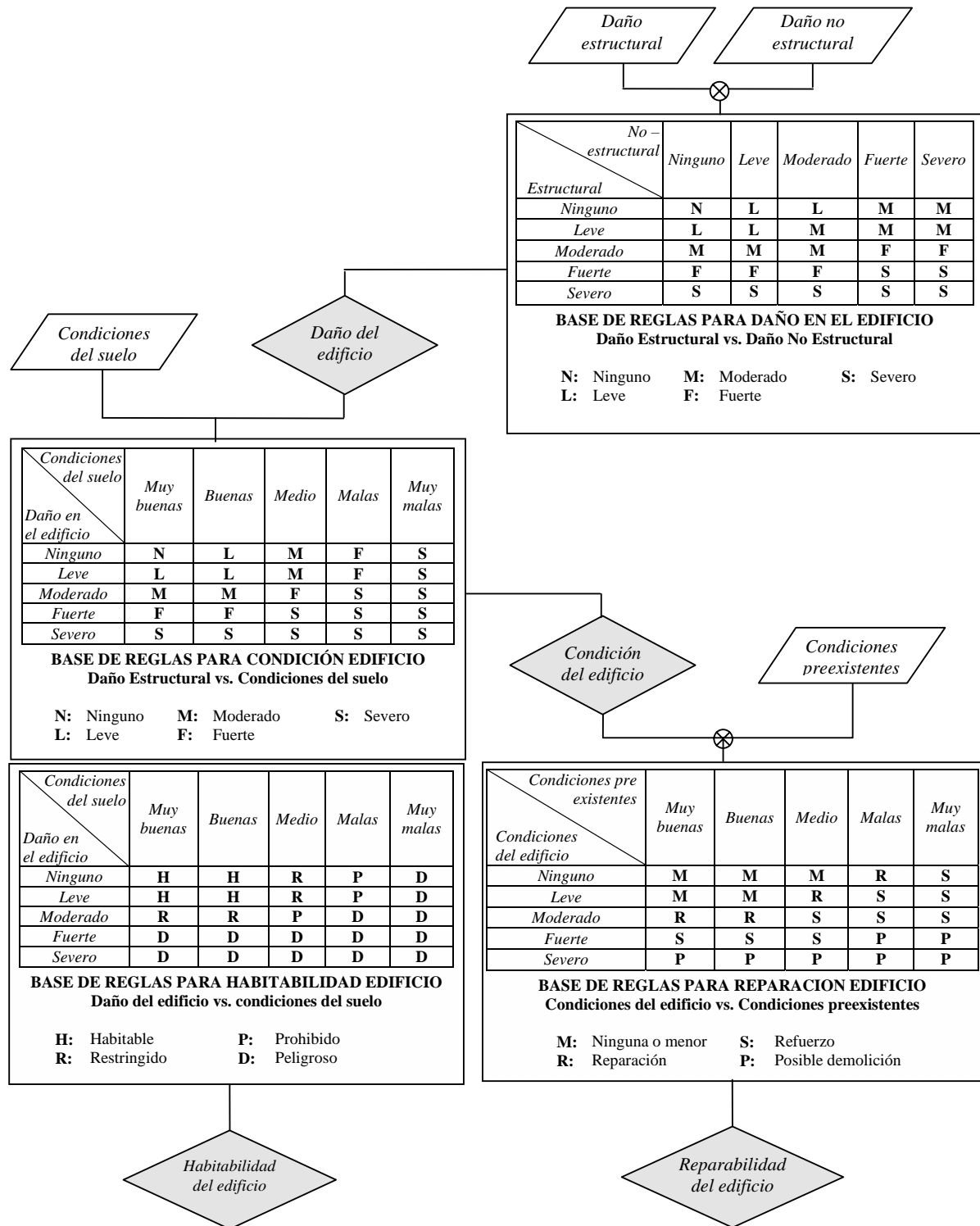


Figura 8: Método para evaluación de la habitabilidad y reparabilidad de un edificio.

## Base de reglas lógicas difusas para toma de decisiones

La habitabilidad y la reparabilidad de las estructuras se valoran basándose en los resultados obtenidos del nivel de daño de los elementos estructurales y no estructurales, el estado de las condiciones del suelo y las condiciones pre-existentes. La Figura 8 muestra el uso de las reglas difusas para estas estimaciones. El nivel de daño global del edificio se deduce a partir de los valores de los resultados del daño estructural y no estructural. El estado global del edificio y la habitabilidad se determinan teniendo en cuenta el daño global del edificio y las condiciones del suelo en dos diferentes bases de reglas difusas. Las calificaciones lingüísticas para la habitabilidad de la estructura tiene cuatro niveles posibles: habitable (inmediatamente habitable), uso restringido (habitable después de reparaciones), peligroso (habitable después de reforzamiento estructural) y prohibido (no habitable). La reparabilidad depende de otra base de reglas lógicas que contempla las condiciones preexistentes del edificio. La reparabilidad tiene cuatro posibles niveles: *ninguna, reparaciones menores, reparación, reforzamiento y posible demolición.*

## PROGRAMA DE EVALUACIÓN DEL DAÑO SÍSMICO EN EDIFICIOS (EDE)

El modelo computacional propuesto ha sido implementado en el programa de Evaluación del Daño Sísmico en Edificios (EDE). En la Figura 9 se muestra la pantalla de presentación. Actualmente, el programa EDE es una herramienta de uso oficial de fácil utilización, muy útil cuando se presenta una emergencia sísmica, adoptada por las oficinas de gestión del riesgo de desastre de las ciudades de Bogotá y Manizales, en Colombia. Este programa busca apoyar la evaluación del daño usando como punto de partida descripciones y fotografías de los diferentes niveles de daño para cada elemento que se evalúa y mediante los cuales el evaluador hace su apreciación visual del edificio. La Figura 10 muestra un ejemplo de cómo se califica el daño en los elementos estructurales y la Figura 11 presenta un ejemplo de estas ayudas para el daño estructural en columnas. El modelo tiene en cuenta las condiciones preexistentes y las condiciones del suelo. Finalmente, la Figura 12 muestra la calificación de la configuración estructural así como las descripciones y fotografías de ayuda para el usuario. Esta herramienta también puede ser de utilidad para el entrenamiento de los evaluadores antes de un terremoto.

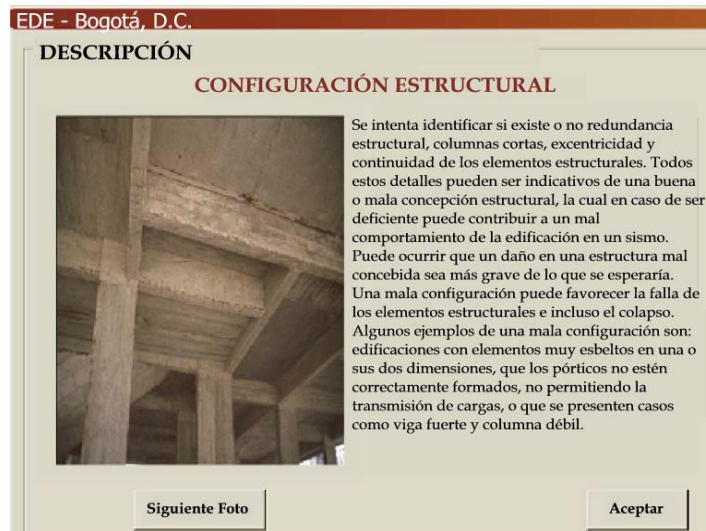


Figura 9: Presentación del EDE.

Figura 10: Evaluación del daño de un elemento estructural.



**Figura 11: Descripción del daño severo en columnas de concreto que ayuda al proceso de evaluación.**



**Figura 12: Descripciones de las ayudas de evaluación de la configuración estructural.**

## EJEMPLOS DE APLICACIÓN DE LA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL

### Ejemplo 1: Edificio de concreto reforzado

El edificio de la Figura 13, construido en el periodo de 1984 a 1997 en la región del Eje Cafetero en Colombia tiene un sistema estructural basado en pórticos de concreto reforzado y losa maciza. Es un edificio de 6 niveles sin sótano ubicado en una esquina. Una evaluación rápida muestra que las condiciones generales del edificio no son malas, así como tampoco el edificio se encuentra inclinado o alguno de sus niveles; no hay asentamientos visibles en las fundaciones y el mayor daño se encuentra en el primer piso. En la Tabla 4 se exponen los datos del daño estructural proporcionados por una inspección detallada. Las Figuras 14 y 15 muestran los detalles de los daños sufridos por las columnas y vigas, y las losas respectivamente.



**Figura 13: Edificio en la zona del Eje Cafetero de Colombia, dañado durante el terremoto de 1999.**

**Tabla 4: Daño en los elementos estructurales.**

<i>Vigas:</i>	Ninguno: 30	Leve: 50	Moderado: 10	Fuerte: 10	Severo: 0
<i>Columnas:</i>	Ninguno: 35	Leve: 35	Moderado: 10	Fuerte: 20	Severo: 0
<i>Nudos:</i>	Ninguno: 60	Leve: 30	Moderado: 0	Fuerte: 10	Severo: 0
<i>Entrepiso:</i>	Ninguno: 40	Leve: 60	Moderado: 0	Fuerte: 0	Severo: 0



**Figura 14: Columna con daño fuerte.**



**Figura 15: Viga con daño moderado.**

Con respecto a los elementos no estructurales, el daño en los muros divisorios es moderado, en las fachadas es ligera y en las escaleras es fuerte. La Figura 16 muestra un ejemplo del daño en un muro divisorio. Las condiciones del suelo son muy buenas ya que no son visibles agrietamientos, inestabilidad de ladera, deslizamientos, asentamientos del suelo ni licuación. Las condiciones pre-existentes son buenas. La calidad de los materiales y de la construcción no es muy buena, pero las irregularidades en planta y altura son mínimas y la configuración estructural es buena.



**Figura 16: Muros divisorios con daño moderado.**

### **Resultados del Ejemplo 1**

Todos los resultados numéricos y lingüísticos, comentarios y descripciones para los cuatro aspectos del problema: daño, riesgo, habitabilidad y reparabilidad están dados por el programa EDE.

**Daño.** El programa presenta los resultados numéricos de los índices de daño y las calificaciones lingüísticas correspondientes a cada grupo de elementos. El índice de daño estructural es 0.3044, que de acuerdo con la escala propuesta, significa que el daño es moderado. El índice de daño no estructural es 0.3783, lo que indica que el daño

no estructural es moderado. Las condiciones del suelo son muy buenas, el valor del índice es 0.0541. Las condiciones pre-existentes son calificadas como buenas y el valor del índice correspondiente es de 0.248.

**Riesgo.** Esta sección califica en forma lingüística el nivel de riesgo, desde el punto de vista de la seguridad de los ocupantes, debido a los daños de los elementos estructurales, no estructurales y las condiciones del suelo. También evalúa el estado global del edificio. El riesgo estructural es *bajo después de tomar algunas medidas de seguridad*, el riesgo por la situación del suelo es *bajo*. El daño del edificio es *moderado* y el resultado proporcionado por el programa EDE es: “El edificio tiene daño moderado estructural y no estructural. El daño puede poner en peligro la estabilidad de la estructura en el caso de una réplica. La resistencia sísmica ha sido disminuida”. Con referencia a las condiciones del edificio, EDE declara “El daño del edificio es moderado y las condiciones del suelo son buenas”.

**Habitabilidad.** En este aspecto el programa EDE toma una decisión sobre si el edificio es habitable o no, además sugiere algunas medidas de seguridad que deben ser tomadas urgentemente. El acceso al edificio analizado en este ejemplo debe ser restringido. La habitabilidad del edificio es segura si los elementos en peligro de caer son removidos o reparados. Los habitantes están en riesgo.

**Reparabilidad.** Esta última sección sugiere algunas medidas que deben ser adoptadas pero sin una descripción detallada. Para eso se requiere la intervención de ingenieros estructurales. El edificio para este ejemplo necesita algunas reparaciones, posiblemente debido a daños menores y condiciones pre-existentes. Es recomendable llevar a cabo un estudio de su vulnerabilidad sísmica.

### Ejemplo 2: Estructura de mampostería no reforzada

La estructura de la Figura 17 construida en el período 1950-1984 en la zona del Eje Cafetero de Colombia, tiene un sistema estructural de mampostería no reforzada y losa maciza. Es un edificio de 3 niveles ubicado en una esquina y no presenta sótanos. Una evaluación rápida muestra que las condiciones generales del edificio no son malas así como tampoco existe inclinación del edificio o de alguno de sus niveles, no hay asentamientos visibles de la fundación y la mayor parte del daño ocurrió en el primer piso. En la Tabla 5 se muestran los datos del daño estructural obtenidos de una inspección detallada. Las Figuras 18 y 19 muestran detalles de los daños sufridos por las paredes y las losas respectivamente.



**Figura 17: Edificio de la zona cafetera de Colombia dañado durante el terremoto de Enero de 1999.**

**Tabla 5: Daño en elementos estructurales.**

<i>Muros de carga::</i>	Ninguno: 0	Leve: 30	Moderado:20	Fuerte: 50	Severo: 0
<i>Entrepiso:</i>	Ninguno: 0	Leve: 70	Moderado:20	Fuerte: 10	Severo: 0



**Figura 18: Muro de carga con daño fuerte.**





**Figura 19: Entrepiso con daño moderado.**

Con respecto a los elementos no estructurales, el daño de los muros divisorios es alto, en la fachada es moderado y en las escaleras es leve. La Figura 20 muestra un ejemplo del daño en una pared divisoria. Las condiciones del suelo son muy buenas ya que no son visibles grietas, inestabilidad, deslizamientos, asentamientos del suelo ni licuación. Las condiciones preexistentes son muy malas. Aunque el edificio no tiene irregularidades en planta ni en altura y la configuración estructural es buena, la calidad del material y la construcción es muy mala, y, por esta razón, las condiciones preexistentes son muy malas.



**Figura 20: Particiones con daño fuerte.**

## **Resultados del Ejemplo 2**

**Daño.** El índice de daño estructural es 0.55, lo que de acuerdo con la escala propuesta significa que el daño es alto. El índice de daño estructural es 0.3993, es decir, moderado. Las condiciones del suelo son muy buenas, el valor del índice es 0.0541. Las condiciones preexistentes están calificadas como muy malas y el valor del índice correspondiente es 0.76.

**Riesgo.** El riesgo estructural es alto, el riesgo no estructural es bajo después de tomar algunas medidas de seguridad y el riesgo del suelo es bajo. El daño del edificio es fuerte y el resultado proporcionado por el programa EDE es “El edificio tiene daños fuertes en la estructura y daño moderado en los elementos no estructurales. La estabilidad del edificio y la seguridad se han afectado. La resistencia sísmica ha sido disminuida”. Con respecto a las condiciones del edificio el programa EDE declara “El daño del edificio es fuerte y las condiciones del suelo son buenas”.

**Habitabilidad.** El edificio es clasificado como *no habitable*. El acceso al edificio pone en peligro la seguridad de los habitantes.

**Reparabilidad.** El edificio posiblemente tiene que ser demolido debido al fuerte daño y a las malas condiciones pre-existentes. Obviamente, la decisión final de demolición requiere la intervención de ingenieros estructurales.



## CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un programa de computador basado en un modelo de inteligencia computacional (o “*soft computing*”), útil para la compleja tarea de la evaluación de daños en edificios después de un terremoto, que mejora las metodologías convencionales existentes y hace posible una evaluación más exacta del daño por parte de profesionales inexpertos. El modelo está basado en redes neuronales artificiales y en enfoques de lógica difusa y es apropiado para la evaluación de daños en edificios dado que permite el uso de información subjetiva e incompleta, que exige la utilización de calificaciones lingüísticas, las cuales pueden ser interpretadas apropiadamente por conjuntos difusos. Se ha utilizado una red neuronal artificial para calibrar el modelo de inteligencia computacional partiendo del juicio de especialistas. El entrenamiento de la red neuronal fue realizado usando una base de datos de evaluaciones reales de daño sísmico hechas por ingenieros expertos. El programa de *Evaluación de Daño Sísmico de Edificios, EDE*, se utiliza como una herramienta oficial para la gestión de riesgo de desastre en las ciudades de Bogotá y Manizales, en Colombia, y es un componente del “Programa Nacional de Evaluación de Edificios” de Colombia, en donde se han desarrollado nuevas guías y formularios de inspección.

La calibración del modelo depende de la disponibilidad de bases de datos confiables de evaluaciones de daños en edificios, realizadas por expertos, las cuales son esenciales para el proceso de aprendizaje de la red neuronal artificial. Dado que actualmente no existen bases de datos de daños en la cantidad deseada, es necesario realizar en futuros terremotos evaluaciones en todos los tipos estructurales que existen en las zonas sísmicas. De esta forma se podría completar el proceso de aprendizaje para aquellas construcciones de las cuales no se ha tenido información suficiente. También es importante mejorar la técnica de recolección de datos de los daños en los edificios y la coordinación para la respuesta de emergencia después de los terremotos; todo esto contribuye a que se pueda contar con una herramienta idónea para la evaluación de daños, la habitabilidad y la reparabilidad de edificios afectados por sismos. Los errores cometidos por inexpertos no es posible evitarlos en el momento de un sismo fuerte, si en el futuro no se cuenta con una herramienta como el sistema experto aquí propuesto.

## RECONOCIMIENTOS

Este trabajo ha sido patrocinado por el programa Applied Research Grants for Disaster Reduction del Consorcio ProVention del Banco Mundial, la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, AIS, y el Ministerio de España de Ciencia y Tecnología, proyectos EVASIS, referencia REN2002-03365/RIES y SIGRIS, referencia CGL2005-04721/BTE.

## APÉNDICE A. Descripción de una Red Neuronal Artificial

La herramienta computacional presentada utiliza una red neuronal artificial (RNA) con una capa de entrada, una intermedia u oculta, y una de salida. Este apéndice describe en detalle este sistema neuro-difuso (Carreño et al., 2006).

*Capa de entrada de la red neuronal artificial.* Las neuronas de la capa de entrada están agrupadas en cuatro grupos, identificados como: elementos estructurales (ES), elementos no estructurales (NE), condiciones del suelo (CS) y condiciones preexistentes (CP). Los datos de entrada para esta capa son, en el caso de los elementos estructurales, el porcentaje de elementos correspondiente a cada nivel de daño y, en el caso de elementos no estructurales las calificaciones lingüísticas globales de cada elemento. Los conjuntos difusos (ver Zadeh, 1965) para cada variable  $i$  (por ejemplo para columnas, muros o vigas) en la capa de entrada son obtenidos de las calificaciones lingüísticas del daño, obtenidas después de una inspección visual del edificio, y proporcionan el daño  $D_j$  en cada nivel  $j$  y su extensión o peso  $w_j$ . La extensión del daño o porcentaje de elementos de un tipo en cada nivel de daño varía de 0 a 100 y es normalizado,

$$w_j = \frac{D_j}{\sum_N D_j}, \quad \sum_N w_j = 1 \quad (\text{A.1})$$

La calificación acumulada del daño en cada variable  $D_j$  es obtenida mediante la unión de los conjuntos difusos escalados, teniendo en cuenta las funciones de pertenencia del daño  $\mu_{D_j}(D_j)$  y su extensión o pesos asignados por el evaluador

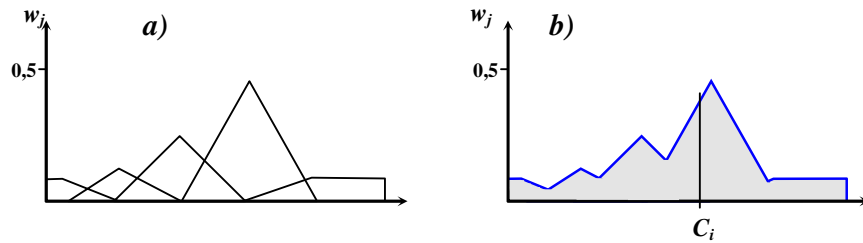
$$D_i = (D_N \cup D_L \cup D_M \cup D_H \cup D_S) \quad (\text{A.2})$$

$$\mu_{D_i}(D) = \max(w_{N,i} \times \mu_{D_N}(D_{N,i}), \dots, w_{S,i} \times \mu_{D_S}(D_{S,i})) \quad (A.3)$$

En teoría, la unión de los conjuntos difusos está representada por una pertenencia o dependencia máxima (ver Nauck *et al.*, 1997; Jang *et al.*, 1997). Mediante la desfuzificación, que se hace calculando el centroide del área de la unión de los conjuntos difusos, se obtiene un índice de calificación  $C_i$  para cada variable de cada grupo de neuronas (véase en Figura A.1)

$$C_i = \left[ \max(w_{N,i} \times \mu_{D_N}(D_{N,i}), \dots, w_{S,i} \times \mu_{D_S}(D_{S,i})) \right]_{centroid} \quad (A.4)$$

Cada variable tiene predefinidas las funciones de pertenencia básicas de los conjuntos difusos correspondientes a los cinco niveles de daño posibles. Las calificaciones lingüísticas cambian en cada caso. La figura A.1 muestra este proceso.



**Figura A. 1: Evaluación del nivel de daño para elementos estructurales. a) Conjuntos difusos, b) Envoltente de la unión de los conjuntos difusos. El punto  $C_i$  corresponde al centroide de área limitada por la envoltente.**

*Capa intermedia u oculta de la RNA.* Esta capa tiene cuatro neuronas correspondientes a cada grupo de variables: elementos estructurales, elementos no estructurales, condiciones del suelo y condiciones pre-existentes. La Figura A.2 muestra un esquema detallado del proceso de evaluación. En este modelo de red neuronal, las variables de entrada no influyen sobre todas las neuronas intermedias, sólo lo hacen sobre la neurona que corresponde al grupo de variables al que pertenecen. Las variables de entrada de estas cuatro neuronas son las calificaciones  $C_i$  obtenidas de cada grupo de neuronas y su respectivo peso  $W_i$  o grado de importancia predefinido. Estos pesos han sido definidos con la participación de expertos en la evaluación de daño sísmico y sus valores para algunos sistemas estructurales se muestran en la Tabla A.1. Las Tablas A.2, A.3 y A.4 muestran los pesos de los elementos no estructurales, las condiciones del suelo y las condiciones preexistentes. Usando estas calificaciones y pesos para cada variable  $i$ , se obtiene un índice global para cada grupo  $k$  de la desfuzificación de la unión o la pertenencia máxima de los conjuntos difusos escalados.

$$I_{SE} = \left[ \max(W_{SE1} \times \mu_{C_{SE1}}(C_{SE1}), \dots, W_{SEi} \times \mu_{C_{SEi}}(C_{SEi})) \right]_{centroid} \quad (A.5)$$

$$\mu_{CSE}(C) = \max(W_{SE1} \times \mu_{C_{SE1}}(C_{SE1}), \dots, W_{SEi} \times \mu_{C_{SEi}}(C_{SEi})) \quad (A.6)$$

Las funciones de pertenencia  $\mu_{C_{ki}}(C_{ki})$  y sus pesos  $W_{ki}$  muestran la información de los grupos de elementos estructurales.

**Tabla A. 1: Pesos para elementos estructurales de acuerdo al tipo de edificio.**

Sistema estructural	Vigas	Columnas	Uniones o conexiones	Muros	Muros de carga	Entrepiso
Pórticos de concreto reforzado	19	46	25	-	-	10
Pórticos de concreto reforzado con muros estructurales	15	-	20	57	-	8
Mampostería confinada	-	-	-	-	73	27
Mampostería reforzada					73	27
Mampostería no reforzada	-	-	-	-	70	30
Muros en bahareque	-	-	-	-	77	23
Pórticos en acero	18	39	35	-	-	8
Pórticos en madera	23	45	21	-	-	11

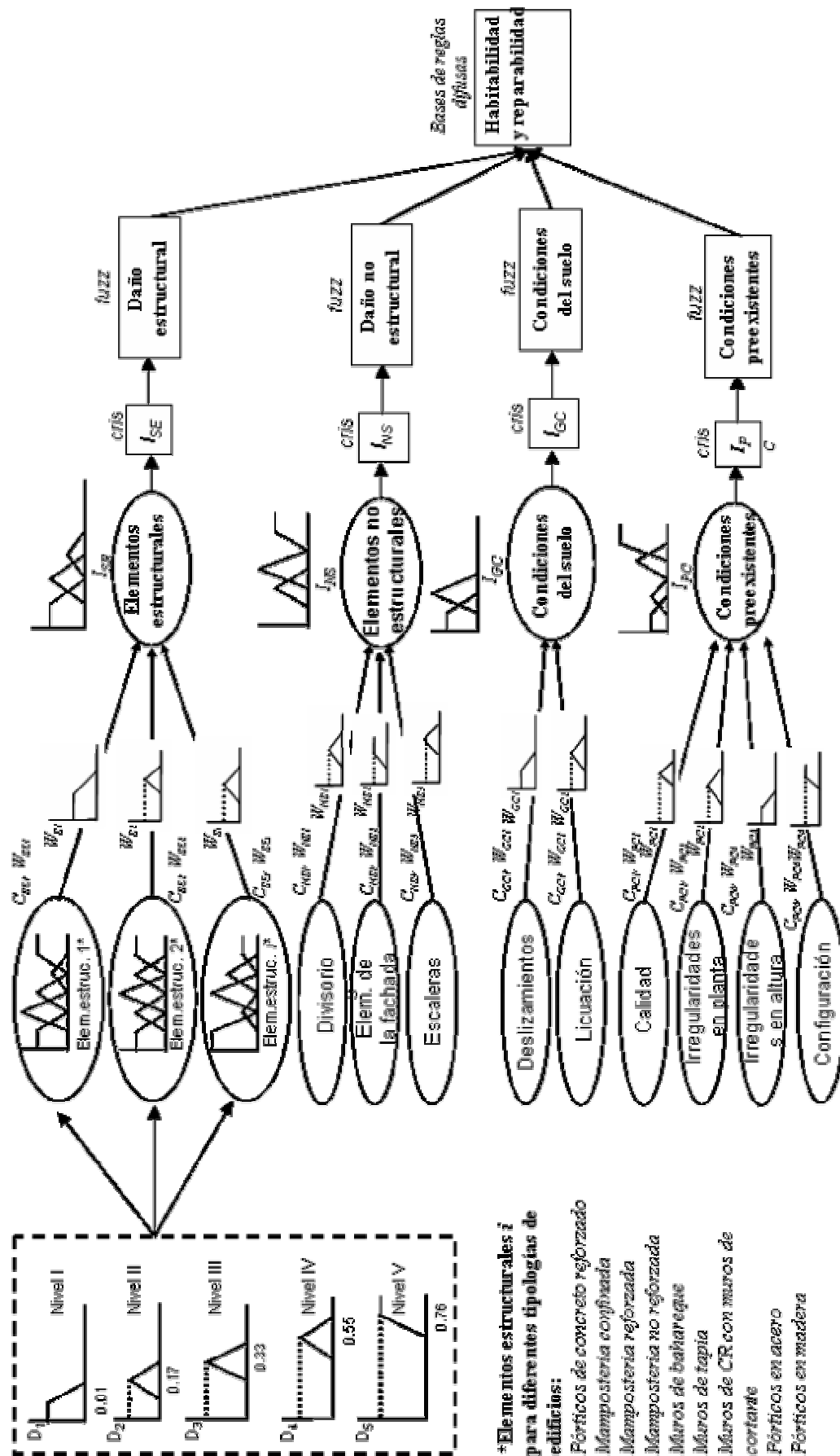


Figura A.2: Estructura de la red neuronal artificial propuesta.

**Tabla A. 2: Pesos en % para elementos no estructurales.**

Elemento	Peso
Muros divisorios	35
Fachada	35
Escaleras	30

**Tabla A. 3: Pesos en % para las condiciones del suelo.**

Elemento	Peso
Grietas en el suelo y deslizamientos	50
Licuaación, asentamientos y subsidencias	50

**Tabla A. 4: Pesos en % par alas condiciones preexistentes del edificio.**

Elemento	Peso
Calidad de los materiales	25
Irregularidades en planta	25
Irregularidades en altura	25
Configuración estructural	25

*Capa de salida de la RNA.* En esta capa se asigna una calificación lingüística final a los índices globales obtenidos para los elementos estructurales, no estructurales, condiciones del suelo y condiciones preexistentes. El nivel de daño se calcula de acuerdo con la proximidad del valor de las funciones globales de daño de referencia. En esta capa se realiza el proceso de entrenamiento de la red neuronal. Los índices que identifican cada nivel cualitativo cambian de acuerdo con los índices calculados en cada evaluación que se hace con la red y con una tasa de aprendizaje. Una vez se han realizado las calificaciones finales es posible determinar el daño global de edificio y la habitabilidad y reparabilidad mediante el uso de un grupo de bases de reglas lógicas difusas.

#### **Proceso de entrenamiento de la RNA**

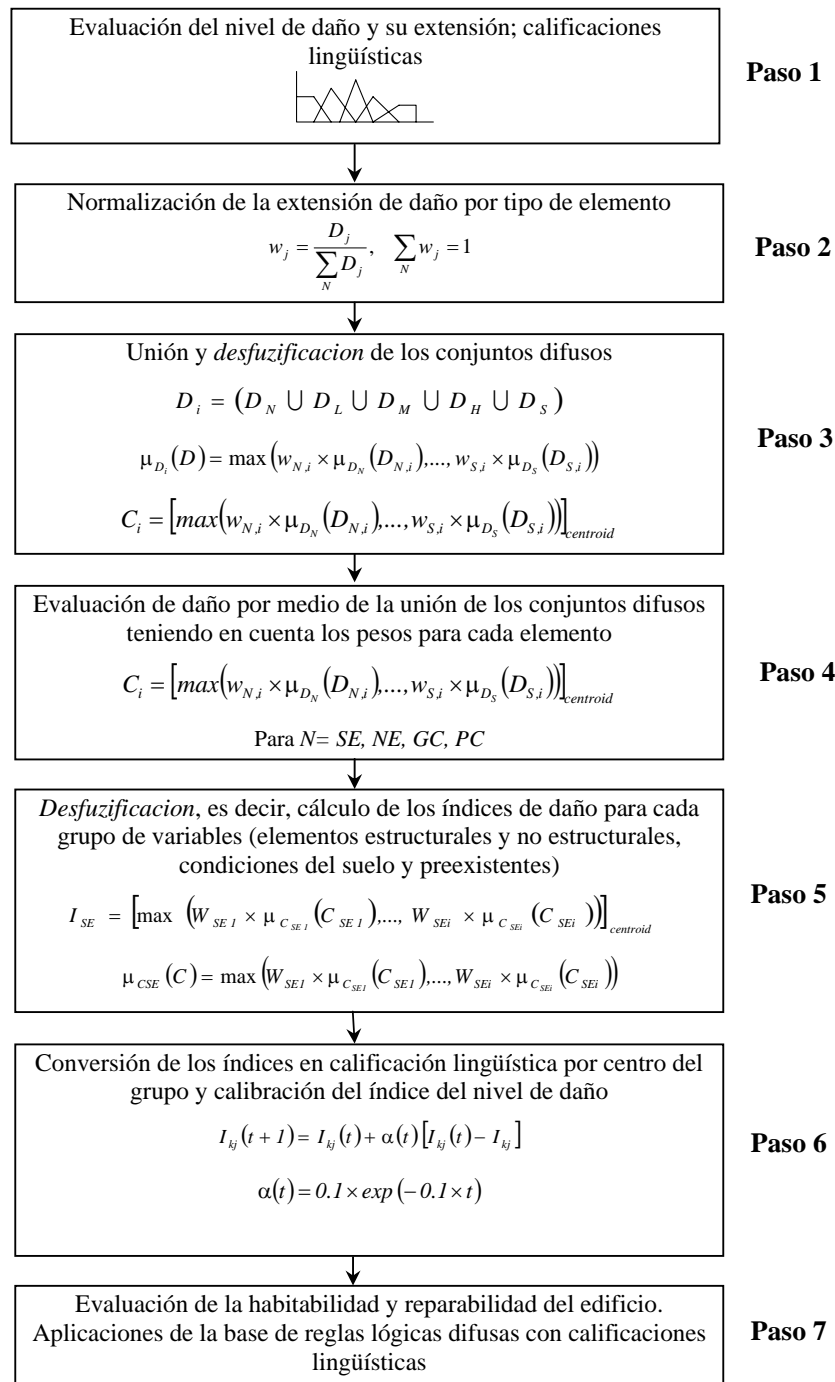
La red neuronal es calibrada en la capa de salida cuando se definen las funciones de daño con relación a los índices de daño existente. Los valores iniciales se muestran en la Tabla 3. La calibración se hace para cada nivel de daño y únicamente los índices correspondientes a los grupos de variables consideradas en cada caso son calibrados. El aprendizaje de la red se realiza utilizando una red tipo Kohonen (1982).

$$I_{kj}(t+1) = I_{kj}(t) + \alpha(t) [I_{kj}(t) - I_{kj}] \quad (\text{A.7})$$

donde  $I_{kj}$  es el valor del índice de daño del grupo de variables  $k$  recalculado en función de la tasa de aprendizaje  $\alpha$  y la diferencia entre el valor  $I_{kj}(t)$  del índice de daño resultante de la presente evaluación y el índice previo en cada nivel de daño  $j$ . La tasa de aprendizaje está dada por

$$\alpha(t) = 0.1 \times \exp(-0.1 \times t) \quad (\text{A.8})$$

Donde  $t$  es el número de veces que el índice que se calibra ha sido usado. La Figura A.3 muestra un resumen del proceso computacional que tiene que ser realizado de acuerdo al modelo propuesto.



**Figura A. 2: Diagrama de flujo del proceso de evaluación del daño.**

## REFERENCIAS

- ATC-13 (1985). *Earthquake Damage Evaluation Data for California*, Applied Technology Council, Redwood City, California.
- ATC-20 (1989). *Procedures for Postearthquake Safety Evaluation of Buildings*, Applied Technology Council, Redwood City, California.
- ATC-20i (2003). *Users manual: Mobile Postearthquake Building Safety Evaluation Data Acquisition System*, (Version 1.0), Applied Technology Council, Redwood City, California.
- ATC-20-1 (2005). *Field Manual: Postearthquake Safety Evaluation of Buildings*, 2nd Edition, Applied Technology Council, Redwood City, California.
- AIS (2002). *Guía técnica para inspección de edificaciones después de un sismo*. Manual de Campo, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, Bogotá, D.C., Colombia.

- AIS (2003). *Manual de Campo para inspección de edificios después de un sismo*, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, Bogotá, D.C., Colombia.
- AIS (2004). *Sistema experto para la evaluación post-sísmica del daño en edificaciones – EDE Bogotá*, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, CD-ROM, Bogotá, Colombia.
- Barbat, A. H., Oller, S., Oñate, E. y Hanganu, A. (1997). “Viscous damage model for Timoshenko beam structures”, *International Journal of Solids Structures*, Vol. 34, No. 30, pp. 3953-3976.
- Barbat, A. H., Cervera, M., Hanganu, A., Cirauqui, C. y Oñate, E. (1998). “Failure pressure evaluation of the containment building of a large dry nuclear power plant”, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 180, pp. 251-270.
- Carreño M.L., Cardona O.D. y Barbat A.H. (2003), “Expert system for post-earthquake building damage evaluation”, Proceedings of the Ninth International Conference on Civil and Structural Engineering Computing, Editado por B.H.V. Topping, Egmond-aan-Zee, Países Bajos, CD-ROM.
- Carreño M.L., Cardona O.D. y Barbat A.H. (2004), *Metodología para la evaluación del desempeño de la gestión del riesgo*, Monografías de Ingeniería Sísmica, CIMNE IS-51, Barcelona, España.
- Carreño M.L., Cardona O.D. y Barbat A.H. (2005). *Evaluación “ex-post” del estado de daño en los edificios afectados por un terremoto*, Monografías de Ingeniería Sísmica, CIMNE IS-53, Barcelona, España.
- Carreño M.L., Cardona O.D. y Barbat A.H. (2006). “Neuro-fuzzy assessment of building damage and safety after an earthquake”, capítulo de *Intelligent Computational Paradigms in Earthquake Engineering*, Nikos D. Lagaros and Yiannis Tsompanakis, Editores, Idea Group, Inc. (en impresión).
- Carreño M.L., Cardona O.D. y Barbat A.H. (2007a). “Urban seismic risk evaluation: a holistic approach”, *Natural Hazards*, Vol. 40, No. 1, pp. 137-172.
- Carreño M.L., Cardona O.D. y Barbat A.H. (2007b). “A disaster risk management performance index”, *Natural Hazards*, Vol. 41, No. 1, pp. 1-20.
- CENAPRED (1996). *Norma para la evaluación del nivel de daño por sismo en estructuras y guía técnica de rehabilitación (estructuras de concreto reforzado)*, Centro Nacional de Prevención de Desastres, Cuadernos de Investigación, Vol. 37, México.
- FEMA (1999). *Earthquake Loss Estimation Methodology HAZUS*, Technical Manual, Vol. I, II and III, first edition 1997, National Institute of Building Sciences, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- Goretti A. (2001). *Post-Earthquake Building Usability: An Assessment*. Technical Report SSN/RT/01/03, Italia.
- Hanganu, A., Oñate, E. y Barbat, A. H. (2002), “A finite element methodology for local/global damage evaluation in civil engineering structures”, *Computers and Structures*, Vol. 80, pp. 1667-1687.
- IISS (1984). *Methodology and procedure for the evaluation of seismic damage*, Instituto de Ingeniería Sísmica y Sismología, Universidad “Kiril y Metodij”, Skopje, Yugoslavia.
- Jang J.-S.R., Sun C.T. y Mizutani E. (1997). *Neuro-Fuzzy and Soft Computing. A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence*, Prentice-Hall, Londres, Reino Unido.
- Kohonen T. (1982). Analysis of a simple self-organizing process. *Biological Cybernetics*, Vol. 43, pp 59-69.
- Kosko B. (1992). *Neural Networks and Fuzzy Systems: A Dynamical Systems Approach to Machine Intelligence*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Nauck D., Klawonn F. y Kruse R. (1997). *Foundations of Neuro-Fuzzy Systems*, John Wiley & Sons, Chichester, Reino Unido.
- Matsuoka, M. y Yamazaki, F. (2004). “Use of satellite SAR intensity imagery for detecting building areas damaged due to earthquakes”, *Earthquake Spectra*, Vol. 20, No. 3, pp. 975–994.
- Oller, S. y Barbat, A. H. (2006). “Moment curvature damage for bridges subjected to seismic loads”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 195, pp. 4490-4511
- Papa F., y Zuccaro G. (2003). *Manuale di esercitazioni sul danno ed agibilità. 13th intensive course, Local seismic cultures and earthquake vulnerability reduction in traditional masonry buildings*, Ravello, Salerno, Italia.
- Park Y.J., Ang A. y Wen Y. (1984). “Seismic damage analysis and damage-limiting design of R.C. buildings”, Structural Research Series, Report No 516, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois.
- Rodríguez M. y Castrillón E. (1995). *Manual de evaluación postsísmica de la seguridad estructural de edificaciones*, Series del Instituto de Ingeniería, 569, Instituto Nacional de Ingeniería, UNAM, México.
- Rutkowska D. (2002). *Neuro-Fuzzy Architectures and Hybrid Learning*, Physica Verlag, Heidelberg, Alemania.
- Sánchez-Silva M. y García L. (2001). “Earthquake damage assessment based on fuzzy logic and neural networks”, *Earthquake Spectra*, Vol. 17, No. 1, pp. 89-112.
- SMIS. (1998). *Manual de evaluación postsísmica de la seguridad estructural de edificaciones*, Secretaría de Obras y Servicios Gobierno del Distrito Federal, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, México.
- Stone W.C. y Taylor A.W. (1993). “Seismic performance of circular bridge columns designed in accordance with AASHTO/CALTRANS standards”, NIST Building Science Series, 170, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg Maryland.
- Zadeh L. A. (1965). “Fuzzy sets”, *Information and Control*, Vol. 8, pp. 338-353.
- Zadeh L. A. (1975). “The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning”, *Information Science*, Part I, Vol. 8, pp. 199-249, Part II, Vol.8, pp. 301-357, Part III, Vol. 9, pp. 43-80.
- Zadeh L. A. (1992). *Fuzzy logic, neural networks and soft computing*. One-page course announcement of CS 294-4, Spring 1993, University of California at Berkeley.



- Zadeh L. A. (1996). "Fuzzy logic and the calculi of fuzzy rules and fuzzy graphs: a précis", *Multiple Valued Logic*, Vol. 1, pp. 1-38.
- Zuccaro G., y Papa F. (2002). "Multimedia handbook for seismic damage evaluation and post event macroseismic assessment", Proceedings of the XXIII General Assembly of the European Seismological Commission, Genova (CD ROM).

