

Evaluación de la habitabilidad de edificios afectados por sismo utilizando la teoría de conjuntos difusos y las redes neuronales artificiales

M.L. Carreño, O.D. Cardona y A.H. Barbat*

Department of Structural Mechanics, Civil Engineering School, Technical University of Catalonia, Barcelona, España

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historia del artículo:

Recibido el 13 de octubre de 2010

Aceptado el 31 de marzo de 2011

On-line el 19 de octubre de 2011

Palabras clave:

Toma de decisiones

Sistema neuro-difuso

Red neuronal artificial

Evaluación post sísmica

Evaluación de la seguridad

Habitabilidad de edificios

Nivel de daño

Reparabilidad

R E S U M E N

La teoría de conjuntos difusos y las redes neuronales son herramientas de inteligencia computacional que cada vez tienen un uso más extendido en la ingeniería sísmica. En este artículo se desarrolla un método y una herramienta computacional que hace uso de estas técnicas para apoyar la evaluación del daño y de la seguridad de los edificios después de sismos fuertes. Se utiliza una red neuronal artificial de tres capas y un algoritmo de aprendizaje tipo Kohonen, así como conjuntos difusos para manipular información subjetiva como las calificaciones de los niveles de daño presentes en los edificios evaluados. También se aplica una base de reglas difusas para contribuir al proceso de toma de decisiones. Se ha desarrollado un programa de ordenador que utiliza estas técnicas, cuyos datos de entrada del programa corresponden a la información subjetiva e incompleta del estado del edificio obtenida por profesionales posiblemente inexpertos en el campo de la evaluación del comportamiento sísmico de los edificios. El método propuesto ha sido implementado en una herramienta de especial utilidad durante la fase de respuesta a emergencias, que facilita las decisiones sobre habitabilidad y reparabilidad de los edificios. Para ilustrar su aplicación, se incluyen ejemplos de aplicación del programa para dos clases diferentes de edificios.

© 2010 CIMNE (UPC). Publicado por Elsevier España, S.L. Todos los derechos reservados.

Evaluation of the habitability of buildings affected by an earthquake using the fuzzy sets theory and the artificial neural networks

A B S T R A C T

The fuzzy sets theory and the artificial neural networks are computational intelligence tools which are nowadays widely used in earthquake engineering. This paper develops a method and a computer program which use these computational intelligence tools in order to support the damage and safety evaluation of buildings after strong earthquakes. The model uses an artificial neural network with three layers and a Kohonen learning algorithm; it also uses fuzzy sets in order to manage subjective information such as linguistic qualification of the damage levels in buildings and a fuzzy rule base to support the decision making process. All these techniques are incorporated in the developed computer program. The input data is the subjective and incomplete information about the building state obtained by possibly non experienced evaluators in the field of the seismic performance of buildings. The proposed method is implemented in a tool especially useful in the emergency response phase, when it supports the decision making regarding the building habitability and reparability. In order to show its effectiveness, two examples are included for two different types of buildings.

© 2010 CIMNE (UPC). Published by Elsevier España, S.L. All rights reserved.

Keywords:

Decision making

Neuro-fuzzy system

Artificial neural network

Post earthquake evaluation

Safety evaluation

Building habitability

Damage level

Reparability

1. Introducción

El criterio actual del diseño con base en la ductilidad y la redundancia estructural tiene como objeto el proporcionar a los

edificios suficiente resistencia para evitar su colapso en caso de sismo, pero no para evitar que se produzcan daños. Por lo tanto, los códigos de construcción sísmicos aceptan daños severos sin colapso en los edificios en caso de sismos fuertes. En muchas zonas sísmicas se han construido innumerables edificios de acuerdo con códigos sísmicos obsoletos o sin ningún tipo de provisión sismo resistente. Como consecuencia, muchos de ellos pueden sufrir diferentes grados de daño durante terremotos fuertes y, en muchos casos, su

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: alex.barbat@upc.edu (A.H. Barbat).

seguridad puede llegar a ser dudosa. Para obtener un rápido diagnóstico del estado de un edificio después de un terremoto, que proporcione información fiable sobre su habitabilidad y reparabilidad, es necesario tener en cuenta no solo los diferentes niveles de daño en los elementos estructurales sino también su estabilidad. Por lo tanto, es necesario llevar a cabo un proceso preciso de evaluación de los daños que requiere la participación de profesionales expertos en el campo de las estructuras, de la mecánica de suelos, de la evaluación de daños y de la rehabilitación de edificios.

Para que se realice un buen proceso de evaluación de daños, es importante contar con evaluadores expertos con amplia experiencia. Sin embargo, cuando ocurre un evento sísmico severo, los daños en la zona pueden ser tan generalizados que no sea 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 la evaluación de daños causados por movimientos sísmicos. Debido a esto, es común que dichos profesionales tiendan a sobreestimar o subestimar el daño existente, permitiendo la ocupación peligrosa o la demolición innecesaria de edificios. Además, la información obtenida mediante los diferentes métodos existentes de evaluación de daños es altamente subjetiva, debido a la definición de los niveles de daño mediante calificaciones lingüísticas como *leve*, *menor*, *moderado*, *medio*, *severo*, etc. El significado de estas calificaciones puede ser interpretado de una manera muy diferente dependiendo de la persona y la experiencia de quien los utilice.

La inteligencia computacional puede ser utilizada para superar este tipo de dificultades del proceso de 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 que es muy útil para las aplicaciones tecnológicas e ingenieriles donde se requieren conceptos criterios de expertos. Refiriéndose a la evaluación del riesgo, [11,13] aplicaron las técnicas de la inteligencia computacional para hacer evaluaciones del riesgo sísmico urbano antes de los terremotos (evaluaciones *ex-ante* [10,16]) y después de los terremotos (evaluaciones *ex-post*), así como para medir el desempeño y la efectividad de la gestión de riesgos de desastres a nivel nacional, subnacional y local [17]. Considerando estas características, 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 y un algoritmo neuro-difuso de aprendizaje no supervisado. 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.

2. Evaluación post sísmica del daño en edificios

A raíz de importantes terremotos ocurridos en diferentes países ubicados en zonas de amenaza sísmica alta, ha sido necesario desarrollar métodos para evaluar el daño de los edificios afectados, con el fin de determinar de forma rápida si son seguros o deben ser evacuados para proteger la vida de sus ocupantes y evitar que el número de víctimas sea mayor en el caso de réplicas. Normalmente, dichos métodos se aplican por medio de dos niveles o etapas: una de evaluación rápida (o de habitabilidad) con base en el nivel de riesgo que representa un edificio para la población, y una

de evaluación detallada, que describe el nivel de daño estructural y su clasificación.

La formulación de una metodología y la elaboración de las herramientas necesarias para la evaluación de la habitabilidad de los edificios permite identificar, después de ocurrido un terremoto moderado o severo, los edificios que hayan sufrido daños graves y que puedan poner en peligro la comunidad, así como también edificios seguros que pueden servir como refugios temporales a personas que hayan perdido sus viviendas o que hayan sido evacuadas por estar comprometida la seguridad de los edificios que ocupaban. Este tipo de evaluación no solo debe permitir dar recomendaciones para la seguridad de la población definiendo la posible ocupación o no de las viviendas, sino también proporcionar recomendaciones técnicas sobre el acordonamiento de áreas inseguras, el apuntalamiento de los edificios o elementos inestables o la demolición de elementos en peligro de caer, entre otros. De manera complementaria, las evaluaciones detalladas de daño no solo deben servir para caracterizar los daños estructurales y no estructurales en los edificios, sino también permitir evaluar los efectos locales de los suelos, estimar de manera aproximada el impacto económico y social del sismo, y generar información para la toma de decisiones por parte de las autoridades, para la formulación posterior de proyectos de reconstrucción y definir estrategias que permitan reducir, a largo plazo, los efectos de futuros eventos sísmicos. Asimismo, deben conducir a mejoras de las normas sismo resistentes vigentes, identificando los defectos de los sistemas estructurales. Finalmente, posibilitan la construcción de curvas de vulnerabilidad observada útiles para el estudio sísmico de los edificios de la zona afectada y de otras zonas similares.

En el desarrollo de metodologías para la evaluación de daños causados por terremotos se destacan las realizadas en la ex República Yugoslava de Macedonia, Estados Unidos (California) [2–4], Japón [19], México [30,33], Italia [21], Turquía, Grecia y Colombia [5–7]. Los procesos realizados en los diferentes países no han sido independientes; por el contrario, los desarrollos de unos han servido como base para trabajos posteriores. Los primeros trabajos realizados en Japón y California sirvieron como punto de partida para los trabajos del [2] y, posteriormente, del [3] y del [4] en Estados Unidos. Los trabajos de la ex-República Yugoslava de Macedonia y Japón fueron utilizados en México en la evaluación de los daños del sismo de 1985 y sirvieron como base, junto con el ATC-20, para las diferentes versiones realizadas posteriormente en 1995 y 1998 [19,30,33]; y estos han sido la base para los desarrollos realizados en Colombia [5–7].

En casi todos los países los formularios y metodologías han sido sometidos a muchas revisiones debido al incremento de conocimientos después de cada sismo. En algunos casos, los procedimientos de evaluación de daños se aplican en diferentes etapas: evaluación rápida, evaluación detallada y evaluación de ingeniería. El objeto de este artículo son las dos primeras. La evaluación rápida o de habitabilidad de los edificios se utiliza comúnmente para definir la posible ocupación y utilización del edificio a corto plazo. Después de la evaluación, se define si los edificios pueden ser usados de manera segura después del sismo y, además se generan unas recomendaciones con el fin de reducir el riesgo de los habitantes. Las metodologías detalladas describen el nivel de daño estructural y su clasificación; se hacen con el objetivo de revisar la seguridad de aquellos edificios sobre los que se tiene alguna duda por los cortos alcances de la evaluación rápida y la poca experiencia de sus evaluadores. Los objetivos de este tipo de evaluación varían según el país; por ejemplo, en Japón se hace con el fin de definir el uso a largo plazo de los edificios, por lo que su resultado es una sugerencia al propietario para que repare, refuerce o demuela su edificio. En Italia el propósito es evaluar globalmente las pérdidas económicas directas y calcular funciones de vulnerabilidad de edificios, ya que la decisión del uso a largo plazo del edificio se

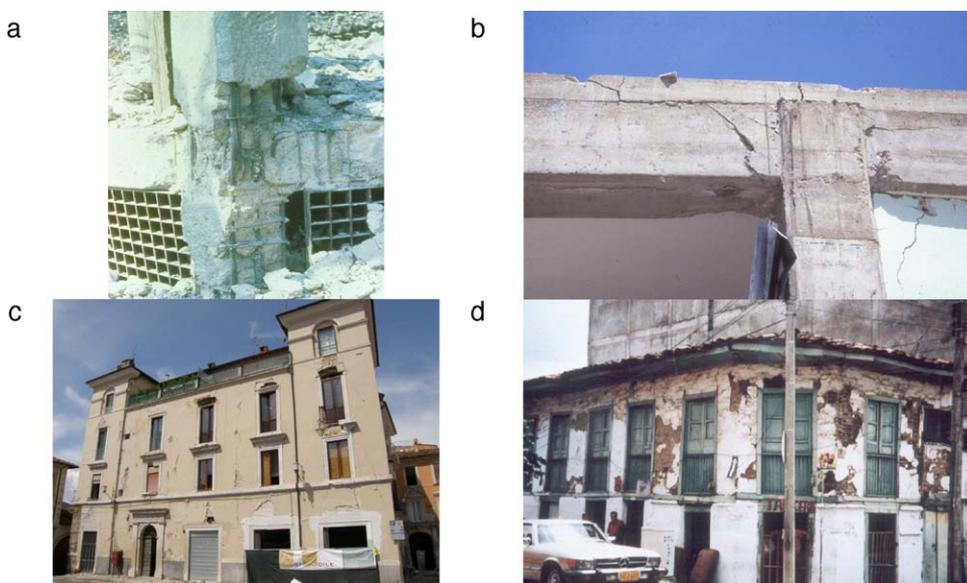


Figura 1. Daño en elementos estructurales: a) daño fuerte en un nudo de hormigón armado; b) daño moderado en una viga de hormigón armado; c) daño fuerte en muros de mampostería; d) daño fuerte en un muro de bahareque.



Figura 2. Daño en elementos no estructurales: a) daño fuerte en muros divisorios; b) daño severo en una chimenea.

hace mediante una evaluación de ingeniería, al igual que en Estados Unidos y México.

La toma de decisiones sobre la habitabilidad y reparabilidad de los edificios partiendo de los complejos patrones del daño observado es realmente una tarea difícil para profesionales inexpertos. Por ejemplo, durante sismos fuertes, en los edificios porticados de hormigón armado, en los pilares aparecen grietas diagonales a causa del cortante o la torsión; mientras que las grietas verticales, el desprendimiento y aplastamiento del hormigón y el pandeo de la armadura longitudinal se deben usualmente a la flexo-compresión. Los daños más comunes en vigas son las fisuras diagonales y la rotura de los estribos debido al cortante o torsión, así como grietas verticales, fallo longitudinal del acero y aplastamiento del hormigón debido a la flexión a cargas alternantes. Las uniones viga-pilar usualmente muestran grietas diagonales como resultado del cortante y su fallo se debe comúnmente a la falta de anclaje de la armadura longitudinal de las vigas en el nudo o debido a la flexión excesiva. Los forjados pueden presentar fisuras a cortante alrededor de los pilares y grietas longitudinales debidas a la flexión excesiva. El daño en los elementos no estructurales representa un gran porcentaje del daño total causado por un terremoto. Habitualmente esto se debe a la falta de conexiones apropiadas entre los tabiques, instalaciones u otros componentes no estructurales y la estructura. También se puede producir por la flexibilidad lateral excesiva de las estructuras, lo que se traduce en un excesivo

desplazamiento relativo entre los pisos. Las grietas diagonales son comunes en los muros divisorios y en las fachadas de mampostería. El aplastamiento de las uniones entre estructuras y los elementos no estructurales, el desprendimiento de los acabados, la rotura de vidrios y de instalaciones de diferente tipo. El desprendimiento de elementos no estructurales puede representar un riesgo para la vida pero no genera, normalmente, el colapso de los edificios. Los niveles de daño en los diferentes elementos estructurales y no estructurales de edificios con diferentes tipologías están ilustrados en las figuras 1 y 2.

Problemas geotécnicos como los fallos en taludes, desprendimientos de rocas, asentamientos o licuación de suelos afectan la condición global de la edificación. Por lo tanto es importante tener en cuenta el efecto de estos aspectos sobre la estabilidad de los edificios a la hora de evaluar su seguridad; algunos ejemplos se pueden observar en la figura 3.

Las condiciones pre-existentes pueden presentar características que incrementan la vulnerabilidad del edificio ante un sismo. Este es el caso de una mala configuración estructural o de mala calidad en la construcción. En la figura 4 se muestran algunos ejemplos de malas condiciones preexistentes.

Los principales elementos para una metodología de evaluación de daños son: la clasificación de los daños, la definición de las posibilidades de uso de los edificios que sufrieron daños, la organización para la recogida de los datos y el análisis y procesamiento de la

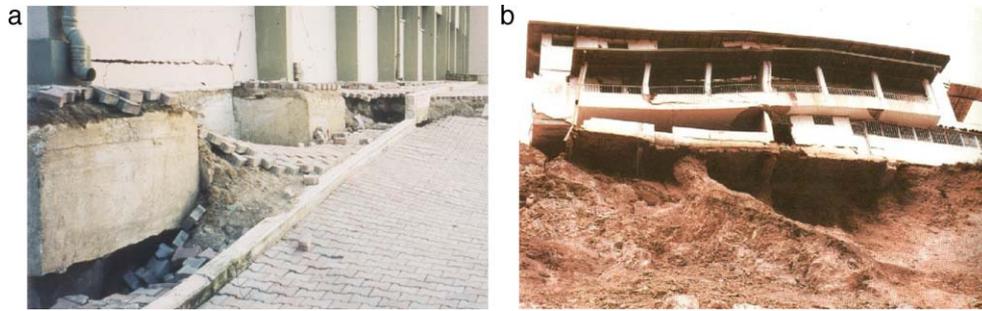


Figura 3. Condiciones del suelo: a) licuefacción; b) deslizamientos.

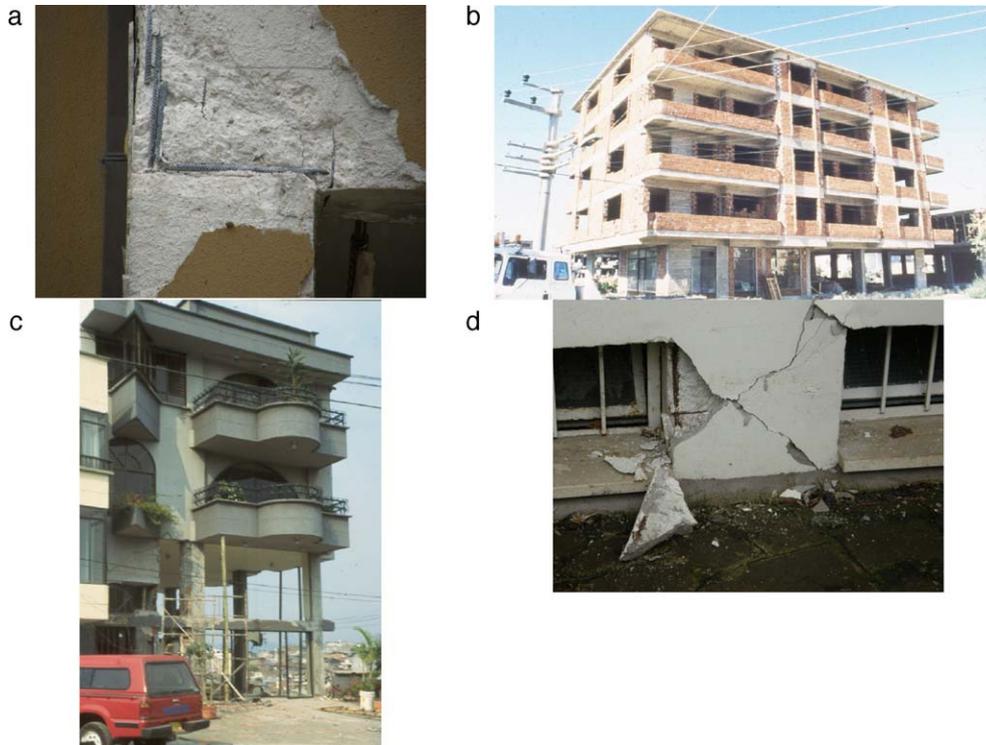


Figura 4. Condiciones preexistentes: a) mala calidad en la construcción, nudo débil, falta de cercos en el nudo; b) irregularidades verticales, piso blando, falta de conexión entre los muros de relleno y la estructura de hormigón armado; c) irregularidades en planta y altura; d) mala configuración estructural, pilar corto.

información. Por esta razón se considera útil no solo describir los diferentes métodos, sino comparar los formularios más recientes y los criterios de evaluación de las diferentes metodologías con el fin de identificar las principales diferencias conceptuales. Algunos ejemplos de guías sistemáticas y procedimientos para evaluar el daño en edificios, que se han desarrollado en varios países, se describen en [14,15,18].

Otros trabajos están relacionados con la identificación de los edificios afectados en áreas de desastre usando imágenes satelitales. Uno de ellos es el método propuesto por [26] que usa un satélite radar de apertura sintética (SAR) 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 la gestión de desastres.

Los métodos de evaluación detallada se refieren especialmente a la inspección de cuatro grupos de elementos: estructura en general, elementos estructurales, elementos no estructurales y aspectos geotécnicos. Los aspectos que evalúan los diferentes métodos detallados se resumen en la tabla 1.

3. Sistema híbrido neuro-difuso de evaluación del daño sísmico

A pesar de las ventajas de las metodologías mencionadas y de los manuales y formularios relacionados para la evaluación del daño en edificios, siguen tomándose decisiones erróneas, como la demolición de edificios no críticos o la evacuación innecesaria de edificios, debido a la falta de experiencia y calificación de los evaluadores. Este hecho genera serios problemas, especialmente en el caso de edificios esenciales. Además, existe la posibilidad de que daños en edificios que puedan poner en riesgo la estabilidad estructural sean ignorados. Para enfrentar este problema, se ha desarrollado un sistema experto y una herramienta computacional para la fase de respuesta a emergencias frente a fuertes terremotos [12,15].

El sistema experto propuesto está basado en redes neuronales artificiales y conjuntos difusos [25,35–38]. 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 incompleta.

Tabla 1
Análisis sobre la inspección de los daños del edificio en los formularios de evaluación detallada

Condición peligrosa	Elementos examinados	Yugoslavia (1984)	ATC-20-2 (1995)	Japón (1985)	México (1998)	Italia (2000)	Colombia (2002)
Estructura en general	Colapso parcial o total	X	X	X	X		X
	Inclinación del edificio o de uno de sus niveles		X	X	X		X
Elementos estructurales	Otros		X		X		X
	Cimentación		X	X	X		
	Techos y pisos	X	X	X	X	X	
	Pilares, pilastras	X	X	X	X		X
	Diafragmas y elementos horizontales		X		X	X	X
	Muros y elementos verticales	X	X		X	X	X
	Pórticos resistentes a momentos		X		X		
	Otro		X			X	X
Elementos no estructurales	Parapetos/ ornamentación		X		X	X	X
	Ventanas		X		X		
	Cielo rasos y luces		X		X	X	
	Muros interiores/ particiones	X	X	X	X		X
	Ascensores		X		X		
	Escaleras y salidas	X	X	X	X		X
	Chimeneas		X			X	
	Instalaciones eléctricas y de gas	X	X		X	X	X
	Otros		X		X	X	X
	Geotécnicos	Fallos de laderas	X	X			
Movimientos del suelo, grietas		X	X	X	X	X	X
Otros			X			X	

Para evaluar el estado global de un edificio desde el punto de vista de su comportamiento 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 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, ya que estas son características imprescindibles para decidir sobre la reparabilidad del edificio.

El modelo y la herramienta computacional propuestos utilizan una red neuronal artificial (RNA) compuesta por tres capas cuya estructura general se muestra en la figura 5. 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, de esta manera hay cuatro neuronas correspondientes a los cuatro grupos. El número de neuronas en la capa de entrada del modelo no es constante, puesto que depende del sistema estructural que se evalúa y de la importancia que se le da a cada grupo de variables. Por ejemplo, si el daño estructural es muy alto impidiendo la habitabilidad del edificio, resulta innecesario evaluar las condiciones del suelo o las condiciones preexistentes. La tabla 2 muestra las variables estructurales para cada uno de los sistemas estructurales considerados.

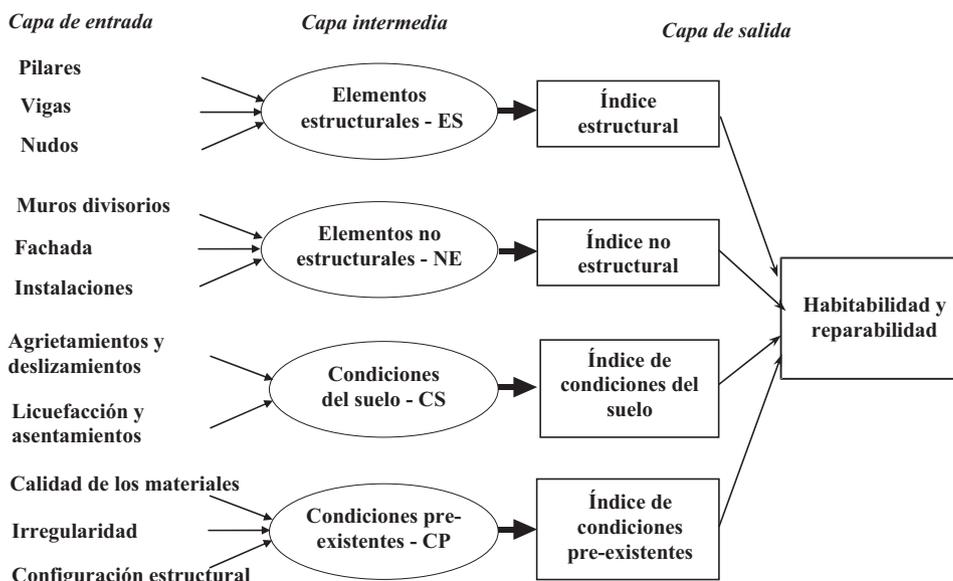


Figura 5. Estructura de la red neuronal.

Tabla 2
Elementos estructurales de acuerdo con el sistema estructural

Sistema estructural	Elementos estructurales
Pórticos en hormigón armado o (con) pantallas a cortante	Pilares/muros, vigas, nudos y losas
Pórticos en acero o madera	Pilares, vigas, conexiones y losas
Mampostería no reforzada/reforzada/confinada	Muros de carga y losas
Muros de tapia o bahareque	Muros de carga y losas

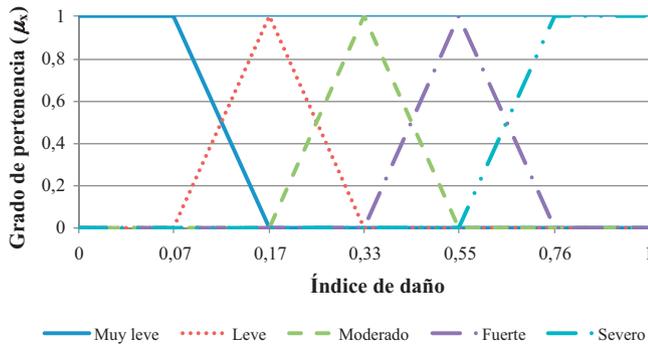


Figura 6. Funciones de pertenencia para las calificaciones lingüísticas.

3.1. 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.

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/muy leve* (*N*), *leve* (*L*), *moderado* (*M*), *fuerte* (*F*) y *severo* (*S*). La figura 6 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.

Las variables de condiciones del suelo y pre-existentes son también valoradas durante el proceso de evaluación y sus calificaciones lingüísticas pueden ser: *muy buena* (*MB*), *media* (*M*), y *muy mala* (*MM*). El daño en los elementos no estructurales no afecta la estabilidad de los edificios, pero puede poner en peligro la seguridad de los ocupantes.

Los conjuntos difusos [35–38] para cada variable *i* (por ejemplo para pilares, muros o vigas) en la capa de entrada son obtenidos de las calificaciones lingüísticas del daño a partir 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, es decir, el porcentaje

Tabla 3
Pesos para elementos estructurales de acuerdo al tipo de edificio

Sistema estructural	Vigas	Pilares	Uniones o conexiones	Muros	Muros de carga	Forjados
Pórticos de hormigón armado	19	46	25	-	-	10
Pórticos de hormigón armado 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

Tabla 4
Pesos para elementos no estructurales

Elemento	Peso
Muros divisorios	35
Fachada	35
Escaleras	30

de elementos de un cierto tipo en cada nivel de daño varía de 0 a 100%,

$$w_j = \frac{D_j}{\sum_N D_j}, \sum_N w_j = 1 \tag{1}$$

la calificación acumulada del daño en cada variable D_j , se obtiene como 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

$$D_i = (D_N \cup D_L \cup D_M \cup D_F \cup D_S) \tag{2}$$

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

en teoría, la unión de los conjuntos difusos está representada por una pertenencia o dependencia máxima (ver [27,23]). 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 (ver fig. 7)

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

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 8 muestra este proceso.

3.2. 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 7 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, solo 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 se muestran en la tabla 3 para algunos sistemas estructurales. Las tablas 4–6 muestran los pesos de los elementos no estructurales, de las condiciones del suelo y de las condiciones pre-existentes. Usando estas calificaciones y pesos para cada variable *i*, se obtiene un índice global para cada grupo *k* a partir de la desfuzificación de la unión de los conjuntos difusos.

$$I_{SE} = [\max(W_{SE1} \times \mu_{C_{SE1}}(C_{SE1}), \dots, W_{SEi} \times \mu_{C_{SEi}}(C_{SEi}))]_{centroid} \tag{5}$$

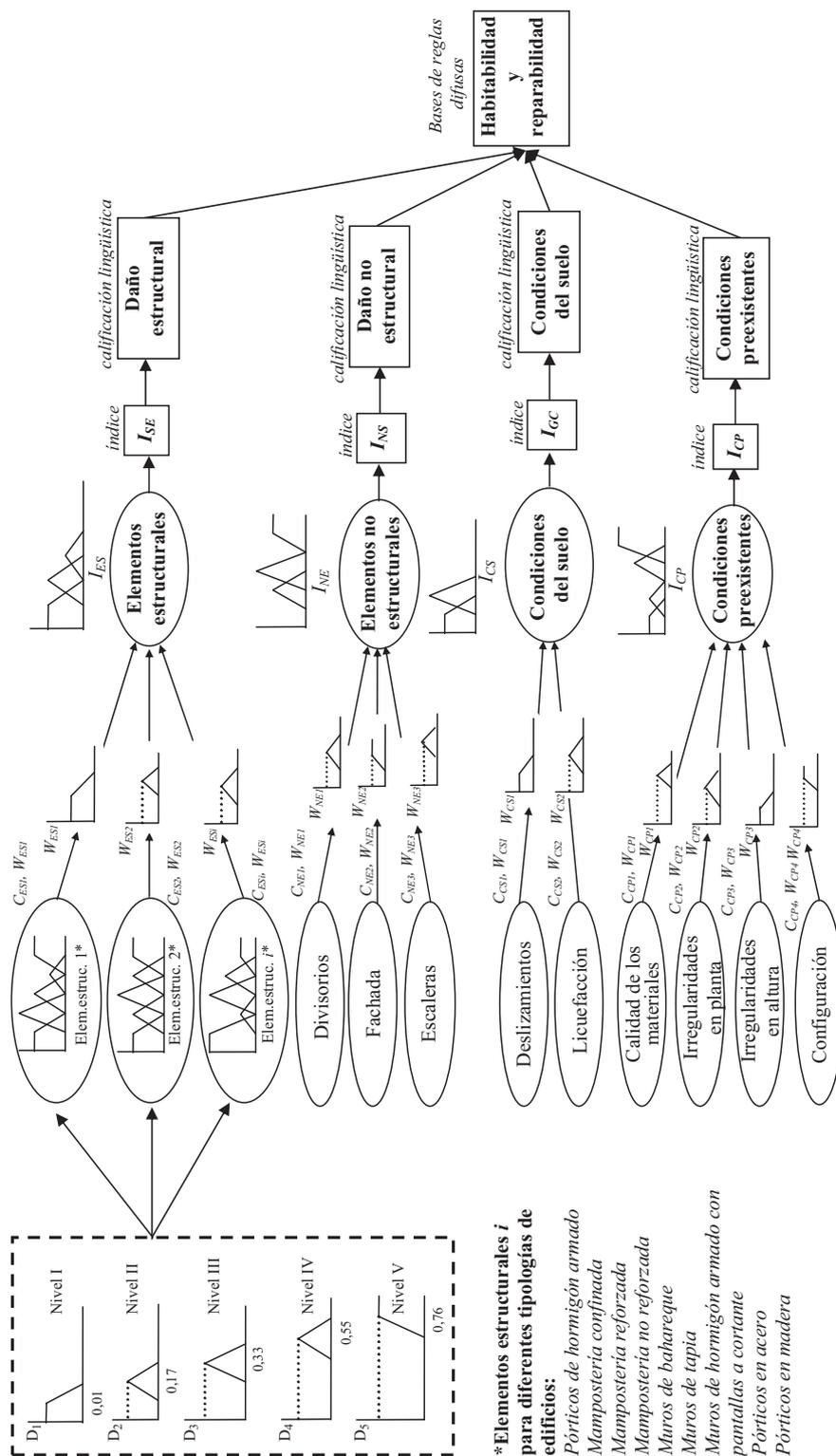


Figura 7. Estructura de la red neuronal artificial propuesta.

Tabla 5 Pesos para las condiciones del suelo

Elemento	Peso
Grietas en el suelo y deslizamientos	50
Licuefacción y asentamientos	50

Tabla 6 Pesos para las condiciones preexistentes del edificio

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

*Elementos estructurales *i* para diferentes tipologías de edificios:
 Pórticos de hormigón armado
 Mampostería confinada
 Mampostería reforzada
 Mampostería no reforzada
 Muros de bahareque
 Muros de tapia
 Muros de hormigón armado con pantallas a cortante
 Pórticos en acero
 Pórticos en madera

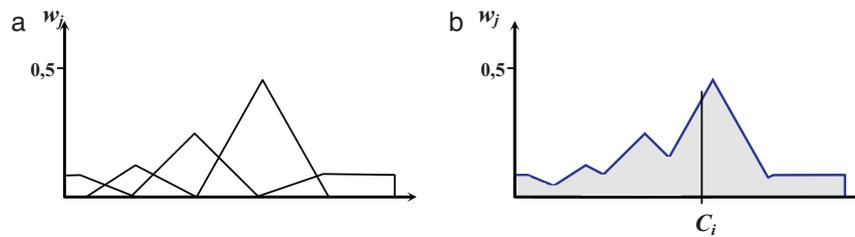


Figura 8. Evaluación del nivel de daño para elementos estructurales. a) Conjuntos difusos; b) envolvente de la unión de los conjuntos difusos. El punto C_i corresponde al centroide de área limitada por la envolvente.

$$\mu_{CSE}(C) = \max(W_{SE1} \times \mu_{CSE1}(C_{SE1}), \dots, W_{SEi} \times \mu_{CSEi}(C_{SEi})) \quad (6)$$

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

En la capa intermedia se obtiene un índice, mediante la *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. Teniendo en cuenta los cuatro índices obtenidos, es posible definir en la capa de salida el daño en el edificio utilizando reglas lógicas difusas con los resultados de las evaluaciones de los elementos estructurales y no estructurales. El cálculo de las reglas difusas se refiere a la parte de la lógica difusa más frecuentemente utilizada en aplicaciones prácticas [31,36,38], su uso es importante cuando las dependencias son imprecisas o cuando no se requiere un alto grado de precisión [31]. Una base de reglas difusas consiste de una colección de reglas lógicas del tipo SI-ENTONCES.

3.3. 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 pre-existentes. 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 [24]. 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 que se han realizado las calificaciones finales, es posible determinar el daño global de edificio, la habitabilidad y la reparabilidad mediante el uso de un grupo de bases de reglas lógicas difusas.

3.3.1. 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 7. La calibración se hace para cada nivel de daño y se calibran únicamente los índices correspondientes a los grupos de variables consideradas en

Tabla 7

Tabla comparativa de los índices de daño

Nivel de daño	Park, Ang y Wen	Sanchez-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

cada caso. El aprendizaje de la red se realiza utilizando una red tipo [24]

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

donde I_{kj} es el valor del índice de daño del grupo de variables k recalculado en función de la tasa de aprendizaje α 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 la ecuación

$$\alpha(t) = 0.1 \times \exp(-0.1 \times t) \quad (8)$$

donde t es el número de veces que el índice que se calibra ha sido usado. La figura 9 muestra un resumen del proceso computacional que tiene que ser realizado de acuerdo al modelo propuesto.

La calibración de los índices de daño parte de índices iniciales predefinidos considerando los propuestos en el [1], las curvas de fragilidad usadas en HAZUS-99 promovidas por [20], los índices de [29] y de [32]. Asimismo, se consideraron índices de daño con base en criterios estructurales de disipación de energía [8,9,22,28]. La tabla 7 presenta una comparación entre los índices propuestos en este trabajo y los propuestos por [29,32]. Valores cercanos a los puntos medios de los rangos de los índices de [29], se escogieron como valores iniciales debido a que han sido calibrados mediante estudios tanto experimentales como numéricos y que son los que cuentan con mayor aceptación. Sus autores consideran que el colapso ocurre para un valor igual a 0,8, aunque [34] afirman 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 considerado un criterio conservador, dadas las controversias existentes.

La red neuronal se calibró para estructuras en hormigón armado y mampostería no reforzada, utilizando las evaluaciones del daño por sismo realizadas después del terremoto del Quindío, en Colombia, en 1999, realizadas por la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS). En total se han utilizado 150 evaluaciones de edificios de hormigón armado y 100 de mampostería no reforzada en la calibración, estos registros fueron usados por ser las evaluaciones más completas sobre el daño estructural y no estructural. 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 son comunes en la zona afectada por el sismo. Los pórticos de hormigón armado 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.

4. Toma de decisiones usando una base de reglas lógicas difusas

La habitabilidad y la reparabilidad de las estructuras se valoran con base en los resultados obtenidos para el nivel de daño de los

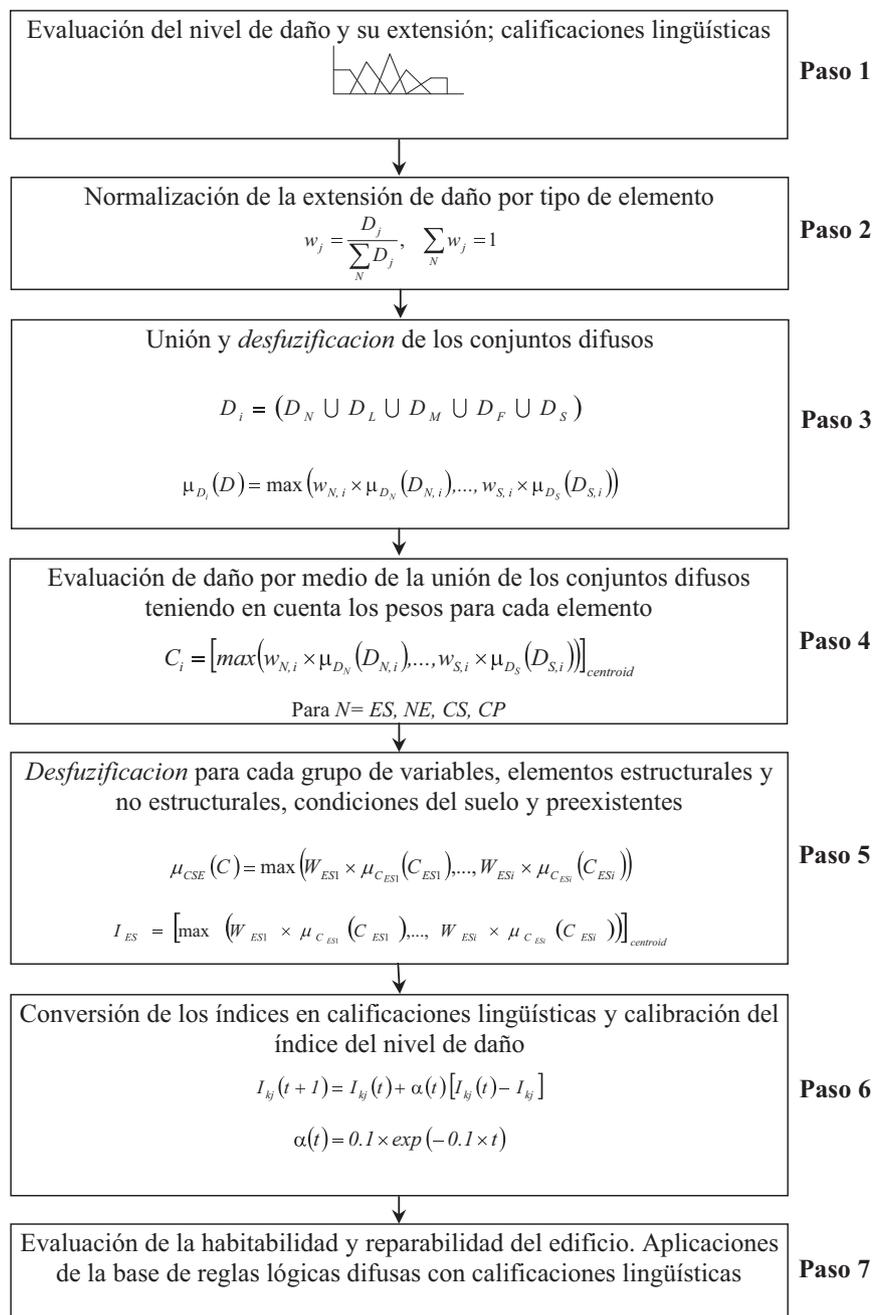


Figura 9. Diagrama de flujo del proceso de evaluación del daño.

elementos estructurales y no estructurales, el estado de las condiciones del suelo y las condiciones pre-existentes. La figura 10 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: *habitabile* (inmediatamente habitable), *uso restringido* (habitabile después de reparaciones), *peligroso* (habitabile 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: *nin-guna*, *reparaciones menores*, *reparación*, *reforzamiento* y *posible demolición*.

5. Programa de evaluación del daño sísmico en edificios (EDE)

El modelo computacional propuesto ha sido implementado en el programa de ordenador Evaluación del Daño Sísmico en Edificios (EDE). Actualmente, el programa EDE es una herramienta de uso oficial de fácil utilización, en caso de emergencia sísmica, adoptada por las oficinas de gestión del riesgo de desastre de las ciudades de

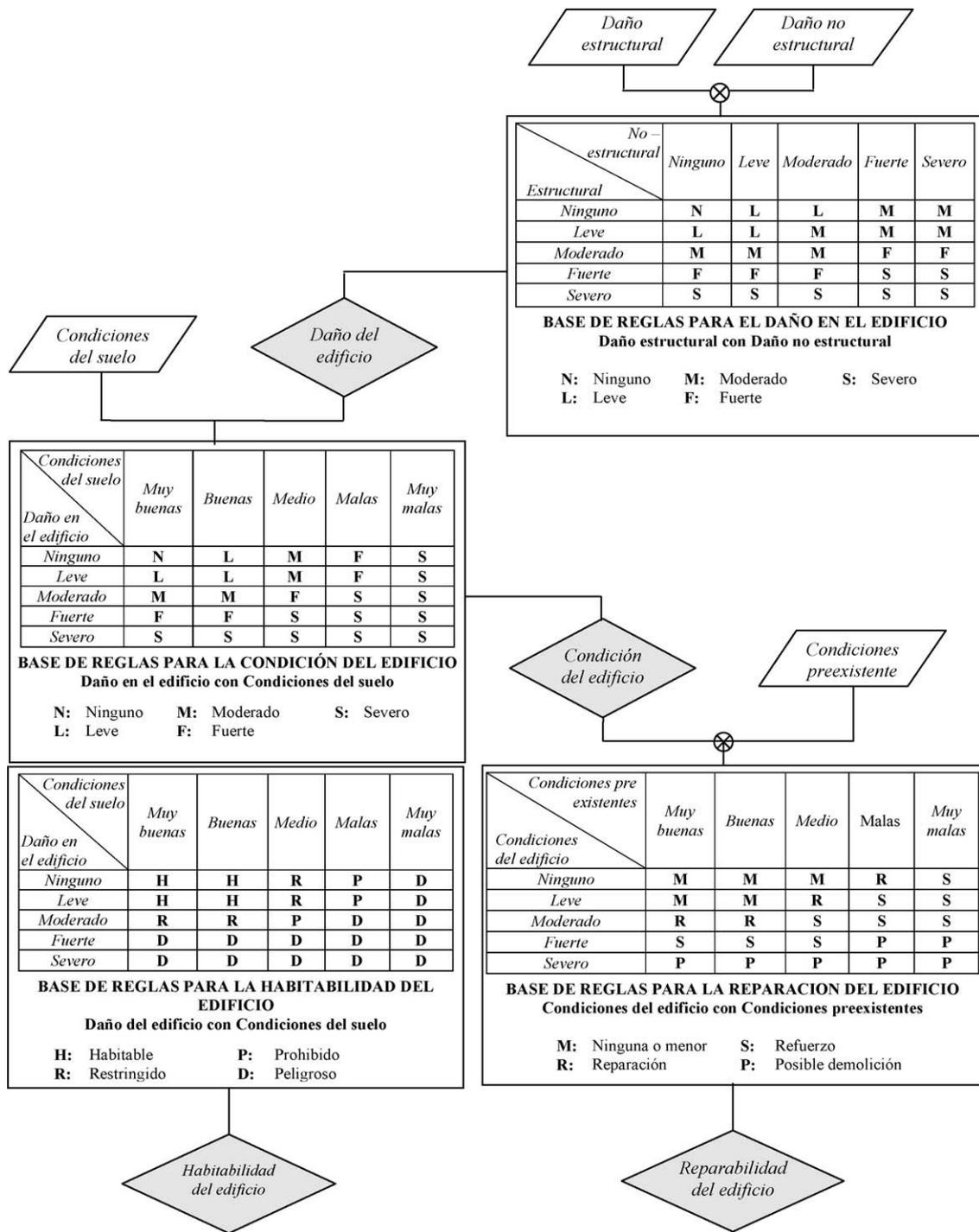


Figura 10. Método para evaluación de la habitabilidad y reparabilidad de un edificio.

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 11 muestra un ejemplo de cómo se califica el daño en los elementos estructurales y la figura 12 presenta el caso de estas ayudas para la evaluación del daño estructural en pilares. El modelo tiene en cuenta las condiciones preexistentes y las condiciones del suelo. Finalmente, la figura 13 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.

6. Ejemplos de aplicación de la herramienta computacional

Se presentan dos ejemplos de aplicación, ambos son edificios ubicados en la ciudad de l'Aquila, Italia, en el valle del rio Aterno, que es la capital de la región de l'Abruzzo y tiene cerca de 73.000 habitantes. Esta ciudad fue afectada, en la madrugada del

Figura 11. Evaluación del daño de un elemento estructural.

Figura 12. Descripción del daño severo en pilares de hormigón armado que ayuda al proceso de evaluación.

Figura 13. Descripciones de las ayudas de evaluación de la configuración estructural.

6 de abril de 2009, por un terremoto de magnitud local $M_l=6,3$ ($M_w=5,3$). En su mayoría, los edificios del área afectada correspondían a sistemas estructurales de pórticos en hormigón armado y mampostería no reforzada, muchos de ellos edificios monumentales del patrimonio cultural de la ciudad.

Después del terremoto fue necesario realizar una evaluación de daños y habitabilidad en cerca de miles de edificios. Los ejemplos que se presentan corresponden a dos de estos edificios.

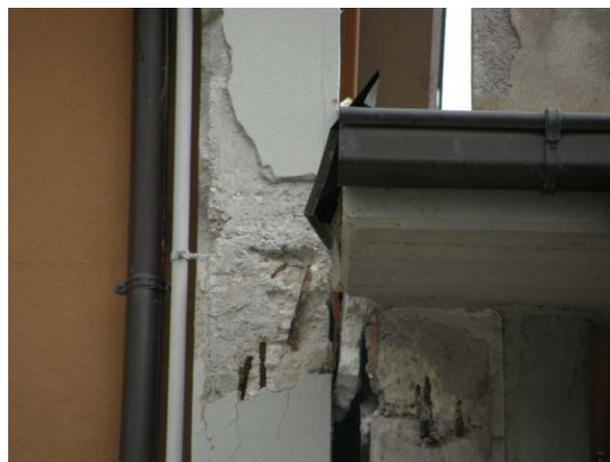


Figura 14. Detalle del daño causado por golpeteo con el edificio vecino.



Figura 15. Edificio de mampostería confinada y forjados con vigas planas.

6.1. Ejemplo 1: edificio porticado de hormigón armado

El edificio evaluado fue construido en 1980, tiene un sistema estructural de pórticos en hormigón armado con losa maciza. Es un edificio de cuatro niveles sin sótano ubicado en una esquina. El edificio presentaba una serie de defectos de configuración estructural como: pórticos planos transversales de hormigón armado con viga fuerte y pilar débil; los pórticos no están conectados entre sí en la dirección longitudinal, armadura trasversal insuficiente en los pilares, con separación uniforme y sin ganchos, lo que no asegura el efecto de confinamiento. El edificio ha sufrido también daños causados por golpeteo con el edificio vecino tal como se observa en la figura 14. La información de daños en el edificio y los resultados de la evaluación se presentan a continuación en las tablas 8 y 9.

6.2. Ejemplo 2: edificio de mampostería confinada

El edificio evaluado fue construido en 1995, tiene un sistema estructural de mampostería confinada y forjados con vigas planas. Este tipo de forjado es de común aplicación en España, y en detalle puede observarse en la figura 15. Es un edificio de tres niveles con un sótano, ubicado en una esquina. La información de daños sufridos por el edificio y los resultados de la evaluación se muestran en las tablas 10 y 11.

Tabla 8
Ejemplo 1, datos de entrada

<p>Información general</p> <p><i>Inspección:</i> Exterior e interior</p> <p><i>Año de construcción:</i> 1980</p> <p><i>Número de pisos:</i> 4</p> <p><i>Número de sótanos:</i> 0</p> <p><i>Sistema estructural:</i> Pórticos en hormigón armado</p> <p><i>Tipo de forjado:</i> Placa macisa</p> <p><i>Localización:</i> Esquina</p>																										
<p>Condiciones generales del edificio</p> <p><i>Colapso:</i> No</p> <p><i>Inclinación del edificio o de un nivel:</i> No se pudo determinar</p> <p><i>Fallo o asentamiento de la cimentación:</i> No</p> <p><i>Piso con mayor daño:</i> 1</p>																										
<p>Daño en elementos estructurales</p> <table border="0"> <tr> <td><i>Vigas:</i></td> <td>Ninguno: 80</td> <td>Leve: 20</td> <td>Moderado: 0</td> <td>Fuerte: 0</td> <td>Severo: 0</td> </tr> <tr> <td><i>Pilares:</i></td> <td>Ninguno: 0</td> <td>Leve: 10</td> <td>Moderado: 60</td> <td>Fuerte: 20</td> <td>Severo: 10</td> </tr> <tr> <td><i>Nudos:</i></td> <td>Ninguno: 10</td> <td>Leve: 70</td> <td>Moderado: 20</td> <td>Fuerte: 0</td> <td>Severo: 0</td> </tr> <tr> <td><i>Forjados:</i></td> <td>Ninguno: 100</td> <td>Leve: 0</td> <td>Moderado: 0</td> <td>Fuerte: 0</td> <td>Severo: 0</td> </tr> </table>			<i>Vigas:</i>	Ninguno: 80	Leve: 20	Moderado: 0	Fuerte: 0	Severo: 0	<i>Pilares:</i>	Ninguno: 0	Leve: 10	Moderado: 60	Fuerte: 20	Severo: 10	<i>Nudos:</i>	Ninguno: 10	Leve: 70	Moderado: 20	Fuerte: 0	Severo: 0	<i>Forjados:</i>	Ninguno: 100	Leve: 0	Moderado: 0	Fuerte: 0	Severo: 0
<i>Vigas:</i>	Ninguno: 80	Leve: 20	Moderado: 0	Fuerte: 0	Severo: 0																					
<i>Pilares:</i>	Ninguno: 0	Leve: 10	Moderado: 60	Fuerte: 20	Severo: 10																					
<i>Nudos:</i>	Ninguno: 10	Leve: 70	Moderado: 20	Fuerte: 0	Severo: 0																					
<i>Forjados:</i>	Ninguno: 100	Leve: 0	Moderado: 0	Fuerte: 0	Severo: 0																					
 <p>Pilar con daño severo</p>	 <p>Pilar con daño moderado</p>																									
<p>Daño en elementos no estructurales</p> <p><i>Divisorios:</i> Fuerte <i>Fachada:</i> Moderado <i>Escaleras:</i> Moderado</p>																										
 <p>Muro divisorio con daño fuerte</p>	 <p>Muro divisorio con daño fuerte</p>																									
<p>Condiciones del suelo</p> <p><i>Inestabilidad de taludes y deslizamientos:</i> No</p> <p><i>Asentamientos:</i> No</p>																										
<p>Condiciones pre-existentes</p> <p><i>Calidad del material y la construcción:</i> Mala</p> <p><i>Irregularidad en planta:</i> Mínima</p> <p><i>Irregularidad en altura:</i> Mínima</p> <p><i>Configuración estructural:</i> Mala</p>																										

Tabla 9
Ejemplo 1, resultados de la evaluación

Daño	<p><i>Daño estructural:</i> Fuerte (0.55)</p> <p><i>Daño no estructural:</i> Fuerte (0.4633)</p> <p><i>Condiciones del suelo:</i> Muy buenas (0.0541)</p> <p><i>Condiciones pre-existentes:</i> Malas (0.6485)</p>
Riesgo	<p><i>Riesgo estructural:</i> Alto</p> <p><i>Riesgo no estructural:</i> Alto</p> <p><i>Riesgo geotécnico:</i> Bajo</p> <p><i>Daño en el edificio :</i> Severo</p> <p>El edificio ha sufrido daños fuertes en su estructura y en los elementos no estructurales. El edificio presenta daños muy graves que lo ponen en peligro de colapso o derrumbe. Sus elementos estructurales están muy deteriorados y dislocados con un número significativo de ellos destruidos.</p> <p><i>Estado global:</i> Muy grave</p> <p>El edificio presenta daños severos y las condiciones del suelo son muy buenas, por lo que la situación del edificio es muy grave.</p>
Habitabilidad	<p><i>No habitable</i></p> <p>La ocupación del edificio representa peligro para la seguridad de sus ocupantes debido a muy grave estado del edificio.</p> <p><i>Medidas de seguridad:</i> Deben colocarse barreras externas al edificio para impedir el paso de personas y vehículos.</p>
Reparabilidad	<p><i>Posible demolición - No reparable</i></p> <p>El edificio posiblemente deberá ser demolido debido a su muy grave estado y a las malas condiciones preexistentes. La decisión final de demolición requiere la intervención de ingenieros estructurales, en principio económicamente no es viable su reparación.</p>

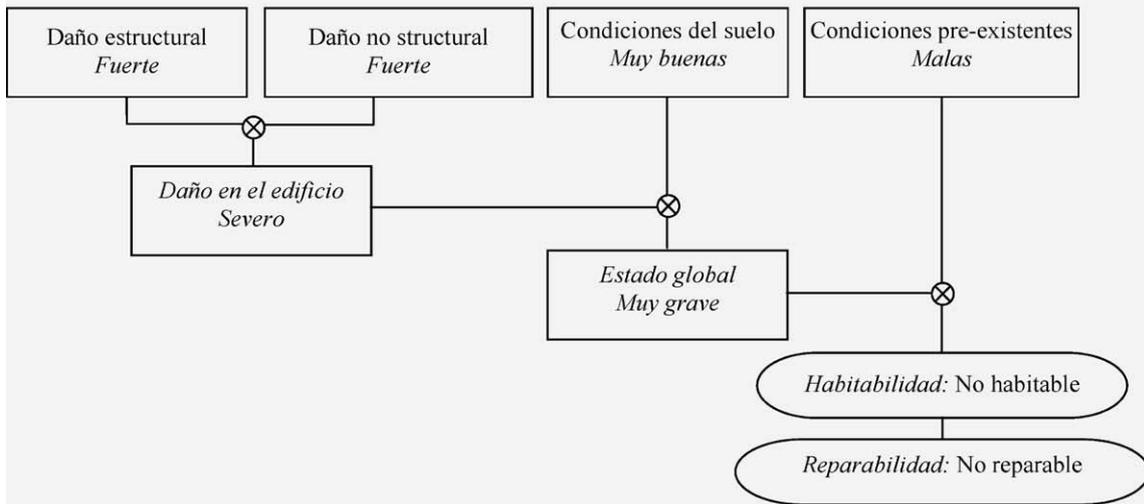
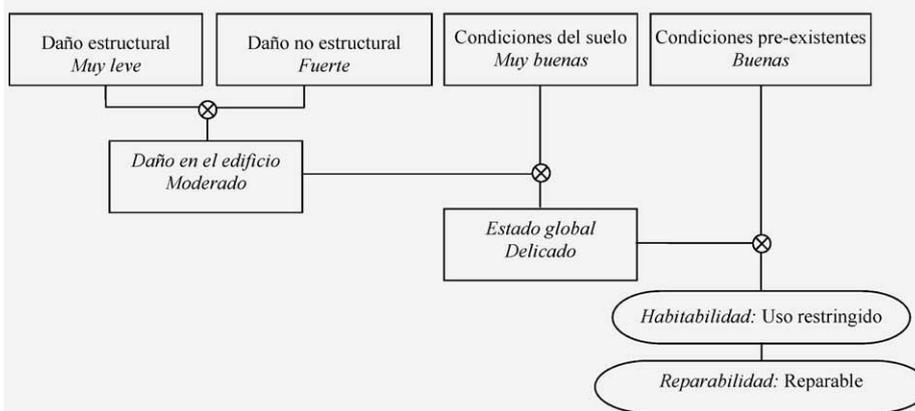


Tabla 10
Ejemplo 2, datos de entrada

<p>Información general</p> <p><i>Inspección:</i> Exterior e interior</p> <p><i>Año de construcción:</i> 1990</p> <p><i>Número de pisos:</i> 3</p> <p><i>Número de sótanos:</i> 1</p> <p><i>Sistema estructural:</i> Mampostería confinada</p> <p><i>Tipo de forjado:</i> Forjado con vigas planas</p> <p><i>Localización:</i> Esquina</p>							
<p>Condiciones generales del edificio</p> <p><i>Colapso:</i> No</p> <p><i>Inclinación del edificio o de un nivel:</i> No</p> <p><i>Fallo o asentamiento de la cimentación:</i> No</p> <p><i>Piso con mayor daño:</i> 1</p>							
<p>Daño en elementos estructurales</p> <p><i>Muros de carga:</i> Ninguno: 60 Leve: 30 Moderado: 0 Fuerte: 0 Severo: 0</p> <p><i>Forjados:</i> Ninguno: 100 Leve: 0 Moderado: 0 Fuerte: 0 Severo: 0</p>							
							
<p>Muro de carga con daño moderado</p>		<p>Muro de carga con daño leve</p>					
<p>Daño en elementos no estructurales</p> <p><i>Divisorios:</i> Fuerte <i>Fachada:</i> Moderado <i>Escaleras:</i> Moderado</p>							
							
<p>Muro divisorio con daño fuerte</p>			<p>Escalera con daño moderado</p>				
<p>Condiciones del suelo</p> <p><i>Inestabilidad de taludes y deslizamientos:</i> No</p> <p><i>Asentamientos:</i> No</p>							
<p>Condiciones pre-existentes</p> <p><i>Calidad del material y la construcción:</i> Regular</p> <p><i>Irregularidad en planta:</i> Mínima</p> <p><i>Irregularidad en altura:</i> Mínima</p> <p><i>Configuración estructural:</i> Regular</p>							

Tabla 11
Ejemplo 2, resultados de la evaluación

Daño	<i>Daño estructural:</i> Muy leve (0.0541) <i>Daño no estructural:</i> Fuerte (0.4633) <i>Condiciones del suelo:</i> Muy buenas (0.0541) <i>Condiciones pre-existentes:</i> Buenas (0.248)
Riesgo	<i>Riesgo estructural:</i> Bajo <i>Riesgo no estructural:</i> Alto <i>Riesgo geotécnico:</i> Bajo <i>Daño en el edificio:</i> Moderado El edificio ha sufrido un daño moderado. Aunque los elementos estructurales no presentan daño, los elementos estructurales sufrieron daño fuerte. No se presenta una reducción en la capacidad sismorresistente de la estructura. <i>Estado global:</i> Moderado El edificio presenta daño moderado y las condiciones del suelo son muy buenas.
Habitabilidad	<i>Uso restringido</i> El acceso a la edificación debe ser controlado y su ocupación debe estar condicionada al retiro o reparación de aquellos elementos que ofrezcan peligro de caerse. Hay un riesgo para la seguridad de los ocupantes como resultado del daño en el edificio. <i>Medidas de seguridad:</i> Deben colocarse barreras externas al edificio para impedir el paso de personas, se recomienda la demolición de elementos suelos.
Reparabilidad	<i>Reparable</i> El edificio requiere algunas reparaciones debido al daño que presenta.



7. Conclusiones

Se ha desarrollado un método con base en un modelo de inteligencia computacional (*soft computing*), útil para la compleja tarea de la evaluación de daños en edificios después de un terremoto. Dicho método y el programa de ordenador correspondiente mejora las metodologías convencionales existentes y hace posible una evaluación más exacta del daño por parte de profesionales inexpertos, especialmente en los casos en los que puede haber dudas sobre la seguridad estructural. El modelo utiliza redes neuronales artificiales y la teoría de conjuntos difusos, lo que lo hace apropiado para la evaluación de los daños en edificios, caso en que la información es subjetiva y puede ser incompleta, lo que exige la utilización de calificaciones lingüísticas, las cuales pueden ser interpretadas apropiadamente por los conjuntos difusos. Se ha utilizado una red

neuronal artificial para calibrar el modelo de inteligencia computacional partiendo del juicio de expertos. El entrenamiento de la red neuronal fue realizado usando una base de datos que contiene evaluaciones reales del daño sísmico hechas por ingenieros expertos después del terremoto de 1999 en Quindío, Colombia. El programa *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 guías y formularios de inspección.

La calibración del modelo depende de la disponibilidad de bases de datos fiables 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 suficientes bases de datos de daños con la calidad necesaria, es

necesario realizar en el futuro evaluaciones para 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 a emergencias sísmicas. Todo esto contribuirá a poder contar con una herramienta idónea para la evaluación de daños, la habitabilidad y la reparabilidad de edificios afectados por sismos. No es posible evitar los errores de evaluación cometidos por inexpertos después de un sismo fuerte, si en el futuro no se cuenta con programas de capacitación de potenciales evaluadores y con una herramienta como el sistema experto aquí propuesto.

La metodología de evaluación ex post del daño y habitabilidad no ha sido utilizada hasta ahora en una emergencia sísmica real. Los ejemplos presentados este artículo fueron tomados de evaluaciones de habitabilidad y daño hechas después del sismo de l'Aquila en el 2009 y se refieren a dos sistemas estructurales: pórticos en hormigón armado y mampostería no reforzada.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al Ministerio de Educación y Ciencia de España, programa CONSOLIDER, proyecto *Safety and Durability of Constructions*, SEDUREC, CSD2006-00060. Este trabajo se realizó también con el apoyo del Comisionado para Universidades e Investigación de Departamento de Innovación, Universidades y Empresa de la Generalitat de Cataluña (programa Beatriu de Pinós) y de la Comisión Europea (proyecto *Methods for the Improvement of Vulnerability Assessment in Europe*, MOVE, FP7-ENV-2007-1-211590).

Bibliografía

- [1] ATC-13, Earthquake Damage Evaluation Data for California, Applied Technology Council, Redwood City, California, 1985.
- [2] ATC-20, Procedures for Postearthquake Safety Evaluation of Buildings, Applied Technology Council, Redwood City, California, 1989.
- [3] ATC-20i, Users manual: Mobile Postearthquake Building Safety Evaluation Data Acquisition System (Version 1.0), Applied Technology Council, Redwood City, California, 2003.
- [4] ATC-20-1, Field Manual: Postearthquake Safety Evaluation of Buildings, 2.^a ed., Applied Technology Council, Redwood City, California, 2005.
- [5] AIS, Guía técnica para inspección de edificaciones después de un sismo. Manual de Campo, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, Bogotá, D.C., Colombia, 2002.
- [6] AIS, Manual de Campo para inspección de edificios después de un sismo, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, Bogotá, D.C., Colombia, 2003.
- [7] AIS, Sistema experto para la evaluación post-sísmica del daño en edificaciones – EDE Bogotá, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, CD-ROM, Bogotá, Colombia, 2004.
- [8] A.H. Barbat, S. Oller, E. Oñate, A. Hanganu, Viscous damage model for Timoshenko beam structures, *International Journal of Solids Structures* 34 (1997) 3953–3976.
- [9] A.H. Barbat, M. Cervera, A. Hanganu, C. Cirauqui, E. Oñate, Failure pressure evaluation of the containment building of a large dry nuclear power plant, *Nuclear Engineering and Design* 180 (1998) 251–270.
- [10] A.H. Barbat, M.L. Carreño, O.D. Cardona, M.C. Marulanda, Evaluación holística del riesgo sísmico en zonas urbanas, *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería* 27 (2011) 3–27.
- [11] O.D. Cardona, J.E. Hurtado, G. Duque, A. Moreno, A.C. Chardon, L.S. Velásquez, et al., System of indicators for disaster risk management: program for Latin America and the Caribbean: main technical report, IDB/IDEA Program on Indicators for Disaster Risk Management, Universidad Nacional de Colombia [consultado enero 2006], Manizales, 2005, <http://www.manizales.unal.edu.co>.
- [12] M.L. Carreño, O.D. Cardona, A.H. Barbat, Expert system for post-earthquake building damage evaluation, en: *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, 2003.
- [13] M.L. Carreño, O.D. Cardona, A.H. Barbat, Metodología para la evaluación del desempeño de la gestión del riesgo, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE), Monografía IS-51, Barcelona, España, 2004.
- [14] M.L. Carreño, O.D. Cardona, A.H. Barbat, Evaluación ex-post del estado de daño en los edificios afectados por un terremoto, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE), Monografía IS-53, Barcelona, España, 2005.
- [15] M.L. Carreño, O.D. Cardona, A.H. Barbat, Neuro-fuzzy assessment of building damage and safety after an earthquake, en: D. Nikos, Lagaros, Yiannis Tsompanakis (Eds.), *Capítulo de Intelligent Computational Paradigms in Earthquake Engineering*, Idea Group, Inc, 2006.
- [16] M.L. Carreño, O.D. Cardona, A.H. Barbat, Urban seismic risk evaluation: a holistic approach, *Natural Hazards* 40 (2007) 137–172.
- [17] M.L. Carreño, O.D. Cardona, A.H. Barbat, A disaster risk management performance index, *Natural Hazards* 41 (2007) 1–20.
- [18] M.L. Carreño, O.D. Cardona, A.H. Barbat, Computational Tool for Post-Earthquake Evaluation of Damage in Buildings, *Earthquake Spectra* 26 (2010) 63–86.
- [19] CENAPRED. 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, México, 37, 1996.
- [20] FEMA, Earthquake Loss Estimation Methodology HAZUS, Technical Manual, Vol. I, II and III, first edition 1997, National Institute of Buildings Sciences of Federal Emergency Management Agency, Washington, 1999.
- [21] A. Goretti, Post-Earthquake Building Usability: An Assessment. Technical Report SSN/RT/01/03, Italia, 2001.
- [22] A. Hanganu, E. Oñate, A.H. Barbat, A finite element methodology for local/global damage evaluation in civil engineering structures, *Computer and Structures* 80 (2002) 1667–1687.
- [23] J.-S.R. Jang, C.T. Sun, E. Mizutani, *Neuro-Fuzzy and Soft Computing. A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence*, Prentice-Hall, Londres, 1997.
- [24] T. Kohonen, Analysis of a simple self-organizing process, *Biological Cybernetics* 43 (1982) 59–69.
- [25] B. Kosko, *Neural Networks and Fuzzy Systems: A Dynamical Systems Approach to Machine Intelligence*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1992.
- [26] M. Matsuoka, F. Yamazaki, Use of Satellite SAR Intensity Imagery for Detecting Building Areas Damaged Due to Earthquakes", *Earthquake Spectra* 20 (2004) 975–994.
- [27] D. Nauack, F. Klawonn, R. Kruse, *Foundations of Neuro-Fuzzy Systems*, John Wiley & Sons, Chichester, Inglaterra, 1997.
- [28] S. Oller, A.H. Barbat, Moment curvature damage for bridges subjected to seismic loads, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 195 (2006) 4490–4511.
- [29] Y.J. Park, A. Ang, Y. Wen, Seismic damage analysis and damage-limiting design of R.C. buildings, *Structural Research Series*, Report No 516, University of Illinois at Urban-Champaign, Urbana, 1984.
- [30] M. Rodríguez, E. Castrillón, Manual de evaluación postsísmica de la seguridad estructural de edificaciones, Series del Instituto de Ingeniería, 569, Instituto Nacional de Ingeniería, UNAM, México, 1995.
- [31] D. Rutkowska, *Neuro-Fuzzy Architectures and Hybrid Learning*, Physica Verlag, Heidelberg, Alemania, 2002.
- [32] M. Sanchez-Silva, L. García, Earthquake damage assessment based on fuzzy logic and neural networks, *Earthquake Spectra* 17 (2001) 89–112.
- [33] SMIS, 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, 1998.
- [34] W.C. Stone, A.W. Taylor, 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 MD, 1993.
- [35] L.A. Zadeh, Fuzzy sets, *Information and control* 8 (1965) 338–353.
- [36] L.A. Zadeh, The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning, *Information science*, Part I 8 (1975) 199–249, Part II, Vol.8, 301–357, Part III, Vol. 9, 43–80.
- [37] L.A. Zadeh, Fuzzy logic, neural networks and soft computing, en: *One-page course announcement of CS 294-4*, Spring 1993, the University of California at Berkeley, 1992.
- [38] L.A. Zadeh, Fuzzy logic and the calculi of fuzzy rules and fuzzy graphs: a précis, *Multiple Valued Logic* 1 (1996) 1–38.