

CAPÍTULO 7

VULNERABILIDAD SÍSMICA DE SISTEMAS

7.1. INTRODUCCIÓN

La evaluación de la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones constituye una de las fases más importantes del proceso de estudio del riesgo sísmico de una comunidad. Como se ha visto, esta evaluación implica un proceso complejo y laborioso que requiere la inversión de gran cantidad de tiempo y recursos, por lo que su implementación debe estar regida por apropiados criterios de jerarquización y racionalización.

Para estimar la contribución que tiene la vulnerabilidad sísmica de determinada instalación o grupo de edificaciones al riesgo sísmico de una comunidad, debe examinarse la importancia relativa de la función que desempeñan en la sociedad. Deben reconocerse los niveles de interrelación que presentan dichas instalaciones en la atención de una comunidad, sobre todo ante situaciones de emergencia debidas a un evento sísmico y no tratarlas de manera aislada y/o individualizada como tradicionalmente se hace, pues se carecería de la apropiada valorización de su importancia relativa. Para lograr este objetivo, resulta conveniente extender la concepción del problema a través de conceptos que permitan considerar la interrelación entre diferentes elementos que conforman un *sistema*.

De hecho, la identificación de la importancia de las instalaciones no es una tarea trivial. La implementación de programas de intervención y reforzamientos de instalaciones existentes debe necesariamente fundamentarse en evaluaciones que permitan jerarquizar los niveles de importancia de las diversas instalaciones esenciales y justificar un programa racional de aplicación de recursos que garantice una óptima reducción de los niveles de riesgo asociados. En este sentido, conviene citar diversas experiencias entre las que destacan el caso de Colombia (OPS, 1999) que a través de su reciente norma sísmica del año 1998, establece la obligatoriedad de evaluar la vulnerabilidad e intervenir o reforzar los hospitales existentes de mayor nivel de complejidad ubicados en las zonas de más alta amenaza sísmica, en un lapso de tres a seis años. Las exigencias establecidas por la comisión de normas de edificaciones del estado de California, USA (OSHPD, 1998) como parte del programa de emergencia sísmica regional, según el cual, todas las instalaciones de salud deben ser intervenidas de manera de garantizar antes del año 2.008, la seguridad de la vida de todos sus ocupantes y antes del 2.030, la capacidad de permanecer operativas después de un evento sísmico. Esta medida afecta alrededor de 2.670 edificios de hospitales y no discrimina la manera de su implementación. Existen otras iniciativas un tanto más racionales como la implementada en Chile (OPS, 1999) a raíz del sismo del año 1.985, que fue especialmente destructivo para la infraestructura del sector salud, donde se inició un programa de identificación y evaluación de la vulnerabilidad hospitalaria con miras a priorizar las intervenciones y reducir el riesgo de la infraestructura de salud. El programa se desarrolló de manera individualizada sobre la base de 14 hospitales representativos de los sistemas constructivos característicos de la región. Una iniciativa similar ha sido adelantada en la ciudad de Guayaquil, Ecuador (OPS, 1999) al evaluar la vulnerabilidad sísmica de los hospitales de la ciudad y proporcionar un diagnóstico preliminar de 20 instalaciones, 12 de las cuales fueron evaluadas cuantitativamente y el resto cualitativamente.

Llama la atención el hecho que si bien, estas medidas contribuyen a reducir los niveles de riesgo sísmico, *su implementación no está fundamentada de manera racional*. No necesariamente las instalaciones más grandes, las más complejas o las más especializadas, son las más importantes en la atención de una crisis sísmica. *El reto consiste en jerarquizar su verdadera importancia en la atención de una crisis sísmica, a los fines de priorizar de manera racional su intervención y reducir de una manera efectiva y eficiente los niveles de riesgo sísmico de la comunidad*.

El presente capítulo introduce los conceptos de sistemas y vulnerabilidad sistémica, como un enfoque general y conveniente para cuantificar la contribución de la vulnerabilidad sísmica de edificaciones esenciales al riesgo sísmico de una comunidad. Se presenta una sistematizada estrategia de evaluación, conforme con la importancia relativa de la función que desempeña la edificación, los niveles de amenaza regional y el desempeño sísmico esperado, desarrollada en tres niveles de evaluación; preliminar, general y detallado. De manera que el objetivo principal del capítulo es sentar los fundamentos que van a permitir diseñar y orientar el método de trabajo para evaluar la vulnerabilidad sísmica de un sistema esencial, partiendo de la propia definición del sistema con todos y cada uno de sus elementos que lo componen. Se pretende desarrollar una estrategia de evaluación lo suficientemente general que pueda ser adaptada a los diferentes sistemas esenciales y que servirá de base para el posterior estudio del sistema sanitario.

7.1.1. El concepto de sistema

Desde un punto de vista genérico, es posible identificar a cada una de estas instalaciones como un elemento. Los *elementos*, constituyen unidades indivisibles que configuran el universo del sistema. La estructura de los elementos del sistema influyen en el comportamiento del mismo pues indican la forma en que están directamente conectados o relacionados entre sí. Así pues, se entiende por *sistema* al conjunto de elementos interrelacionados, entre los cuales existe una cierta cohesión y unidad de propósito. Se identifica de esta definición un conjunto de elementos $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ y un conjunto de relaciones entre ellos $R = \{r_{ij}, i, j = 1, \dots, n\}$, entonces el sistema queda definido como $S = (E, R)$. Por *comportamiento de un sistema* se entiende la dependencia de las respuestas de los elementos a los estímulos que reciben. Estímulo y respuesta están conectados por funciones que indican las relaciones directas entre los elementos del sistema (Ashworth, 1984).

La extensión de estos conceptos genéricos al campo del estudio del riesgo sísmico constituye un enfoque bastante conveniente ya que permite además de ampliar el marco de referencia de la evaluación, dar cabida a las diferentes instalaciones involucradas en la atención de la emergencia y considerar sus diferentes niveles de interrelación. Cada una de estas instalaciones constituye un elemento expuesto, que agrupados según las funciones específicas que desempeñan, configuran los sistemas o sub-sistemas y cuyas relaciones vienen determinadas por el grado de interdependencia del servicio o función que desempeñan en la comunidad, bien sea a nivel urbano o regional, sobre todo en la atención de una emergencia sísmica.

7.2. RIESGO SÍSMICO DE SISTEMAS URBANOS Y REGIONALES

La definición del riesgo como una combinación de la amenaza y la vulnerabilidad permite ver a los sistemas urbanos y regionales como un componente del riesgo en sí

mismo y no como meros elementos expuestos a un factor externo (EC-SERGISAI, 1998). Los diversos elementos que constituyen estos sistemas interactúan de una manera inesperada durante las crisis sísmicas, de manera que las consecuencias son, no sólo el resultado de las fuerzas naturales asociados al fenómeno sísmico, sino de la capacidad de respuesta de la sociedad y de preparación de la población.

La complejidad de estos sistemas se pone de manifiesto al reconocer el carácter dinámico de su comportamiento, tanto en el espacio como en el tiempo, y el alto grado de interrelación que existe entre los componentes que le integran, de manera que cuando un sistema urbano o regional está expuesto a un determinado nivel de amenaza sísmica es importante evaluar la vulnerabilidad de sus componentes y su contribución a incrementar el nivel de riesgo sísmico.

Para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de los diversos componentes de un sistema urbano o regional, existen una variedad de metodologías que permiten a través de parámetros relacionados con la tipología, características de los elementos estructurales y no estructurales, entre otros, definir su contribución al riesgo. Estas metodologías descritas en el capítulo 5, generalmente están orientadas a describir la predisposición que tiene un sistema para sufrir daños físicos directos que comprometan a las personas, a las propias instalaciones y al mantenimiento de su funcionalidad, conocida como *vulnerabilidad física*.

Sin embargo, durante y después de la ocurrencia de un desastre de origen sísmico, y como consecuencia de los daños físicos en los diversos componente de un sistema, hay pérdida en la capacidad de respuesta, cooperación y coordinación de los entes responsables de gestionar la atención de la emergencia, que pone de manifiesto una *vulnerabilidad organizacional*, además de los efectos que pueden tener las fallas ocurridas en un sistema sobre otros sistemas, conocida como *vulnerabilidad sistemática* (EC-SERGISAI, 1998).

Así pues, la vulnerabilidad urbana y regional puede ser obtenida como la combinación de la vulnerabilidad física, la vulnerabilidad organizacional y la vulnerabilidad sistemática de los diversos sistemas y sub-sistemas que le componen, enfoque conocido como *vulnerabilidad sistémica*¹.

7.3. VULNERABILIDAD SISTÉMICA

Los efectos de un desastre durante la emergencia debida a una crisis sísmica y luego en las fases de recuperación y reconstrucción, generalmente no están confinados al área del desastre, pudiendo extenderse a las zonas periféricas, la región circundante y hasta la propia nación y naciones vecinas. De allí la importancia de identificar, a diferentes escalas, los sistemas y sub-sistemas expuestos a los efectos de un sismo, y evaluar sus niveles de interrelación e importancia relativa a través del enfoque de la *vulnerabilidad sistémica*.

Según este enfoque, el aspecto más importante es la identificación, sobre diferentes escalas territoriales, de los sistemas y sub-sistemas vulnerables o susceptibles de ser dañados por un evento sísmico y la definición de sus niveles de interrelación. El ámbito territorial de afectación determina la escala geográfica del estudio. Tradicionalmente los

¹ El término *sistémico* que se emplea, tiene su principal aplicación en el campo de la Patología, y describe aquella condición que afecta de modo global a todos los elementos del sistema, afectando o alterando el comportamiento del mismo.

estudios pueden tener un alcance regional, sub-regional o local, referido específicamente a algún centro urbano. En este sentido, la Tabla 7.1., reproduce la propuesta del EC-SERGISAI (1998) donde se proponen para las diferentes escalas geográficas de evaluación, los sistemas, sub-sistemas y elementos expuestos que deben ser considerados.

Tabla 7.1. Sistemas y sub-sistemas que deben considerarse para diferentes escalas geográficas

<i>Escala Geográfica</i>	<i>Sistemas</i>	<i>Sub-sistema y elementos que deben considerarse</i>
Regional	Infraestructura Transporte	Distribución de centros urbanos Líneas vitales regionales / Industrias principales Instalaciones públicas de importancia regional Redes de transporte y comunicación regionales
Sub-regional o Metropolitana	Infraestructura Transporte	Morfología urbanas / Líneas vitales Áreas residenciales / Áreas industriales Vías de acceso / Instalaciones públicas
Urbana	Planta urbanística Planta de Edificaciones	Urbanismos e infraestructura urbana Vialidad de acceso locales / Centros residenciales Edificaciones escolares, hospitales, culturales, etc. Instalaciones públicas / Industrias Líneas vitales locales

Reconocidos los sistemas, es posible identificar aquellos elementos que son sensibles al evento sísmico. Su caracterización puede ser establecida a través de parámetros representativos de la vulnerabilidad sísmica, que permitan estimar el daño directo sobre estos elementos, así como los daños indirectos sobre otros sistemas. Su interrelación, está determinada por la función específica que debe desarrollar en la atención de la emergencia sísmica y relacionada con la importancia relativa. De manera que su participación o actuación ante una situación de crisis sísmica permitirá calificar su propio desempeño sísmico y su contribución al desempeño sísmico del sistema al cual pertenece.

Otro de los aspectos indispensables para el desarrollo de este enfoque es la posibilidad de analizar las relaciones existentes entre los elementos y los efectos esperados, a los fines de obtener la mejor descripción de los sistemas y su interrelación, cuando hay pérdida de funcionalidad de algunos de estos elementos, como consecuencia de un evento sísmico de una determinada intensidad. La Fig. 7.1., tomada de EC-SERGISAI (1998), presenta como ejemplo un amplio esquema que considera la interacción entre diferentes sistemas a una escala sub-regional y urbana. En la misma se identifican diferentes objetos presentes a escala sub-regional y urbana, con los posibles daños físicos directos, la eventual amenaza inducida y el daño físico inducido, así como el sub-sistema afectado y sus consecuencias o daño sistemático e indirecto. Así por ejemplo, para el grupo de edificaciones esenciales representadas por los hospitales, bomberos e instalaciones de atención de emergencias, se esperan daños físicos directos en los edificios donde funcionan sus instalaciones, sobre las maquinarias para búsqueda y rescate y sobre los equipos de cuidado médico. El escape de materiales tóxicos de los hospitales representa una amenaza inducida, que puede ocasionar otros daños físicos inducidos. Estos daños limitan la capacidad de respuesta del sistema sanitario y de atención de emergencias, y en especial los servicios de tratamiento y emergencias, propiciando de manera sistemática fallas o retrasos severos en las operaciones de emergencia debido a los problemas de organización y coordinación.

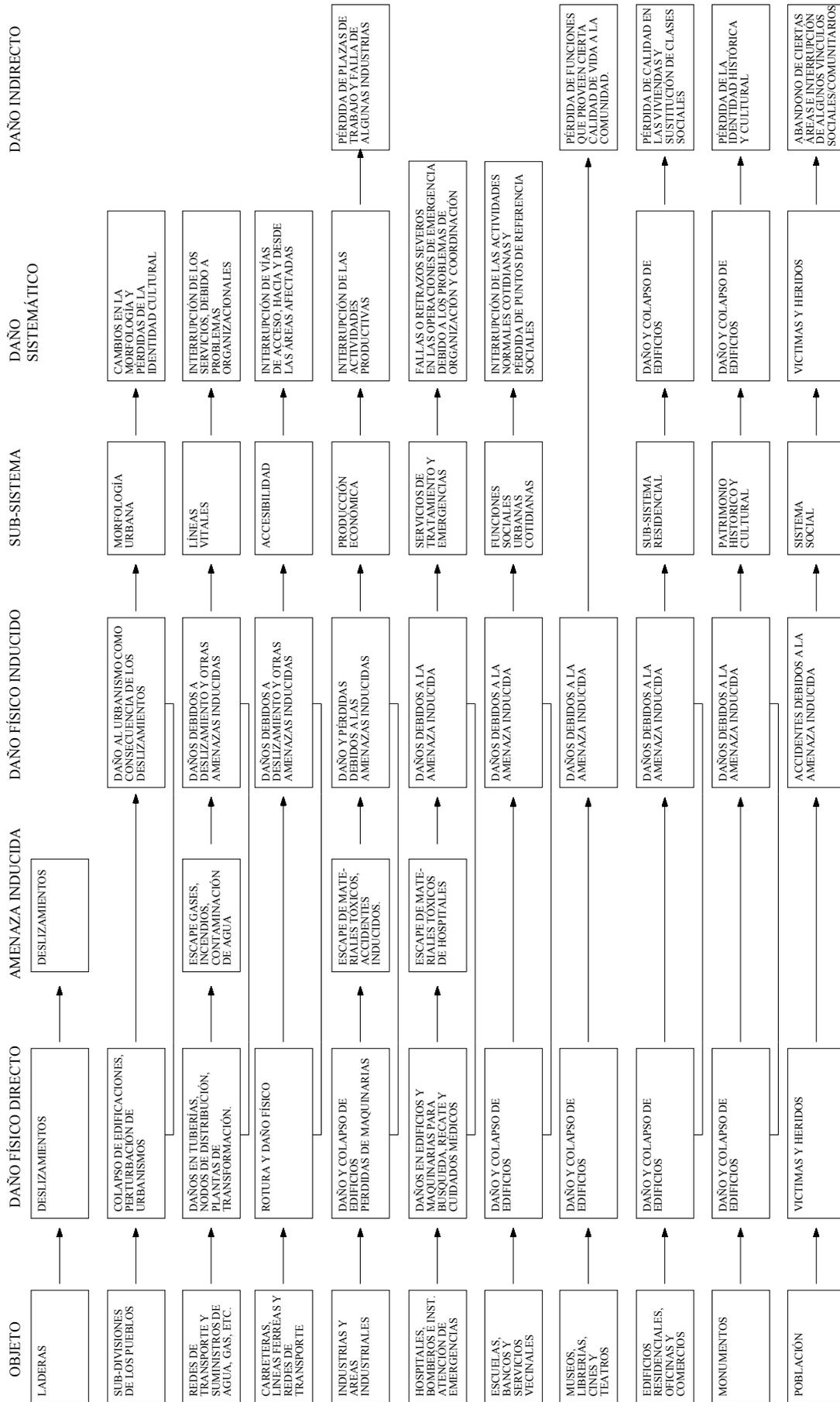


Fig. 7.1. Interacción entre Sistemas a Escala Sub-Regional y Urbana

Como resultado, es posible obtener para cada sistema y asociado a una escala geográfica determinada, la condición de vulnerabilidad de los elementos que le integran y su relación con la pérdida de funcionalidad de la totalidad o de parte del sistema, así como su impacto en el riesgo sísmico. Desde este punto de vista, la aplicación de este enfoque hace posible por ejemplo examinar, la contribución de la vulnerabilidad de los puentes y los túneles, sobre el sistema de transporte a escala regional o bien, la contribución de la vulnerabilidad de los hospitales y otros centros de atención de salud, sobre el sistema sanitario regional.

7.4. EDIFICACIONES ESENCIALES: CONTRIBUCIÓN AL RIESGO SÍSMICO

Utilizando como base el enfoque de la *vulnerabilidad sistémica* es posible analizar la contribución que tiene la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones esenciales al riesgo sísmico de una comunidad. Bajo la óptica de este enfoque, la mayoría de las edificaciones esenciales tienen un impacto relevante principalmente a escala urbana, llegando a tener algunas de estas instalaciones impacto a escala sub-regional. En particular, las edificaciones destinadas a usos hospitalario, escolares, los servicios municipales, así como las oficinas administrativas y gubernamentales, entre otras, constituyen elementos vulnerables que forman parte esencial de los centros urbanos y comunidades, susceptibles de sufrir daños directos e indirectos y limitar significativamente la capacidad de respuesta ante un desastre sísmico.

Cada una de estas edificaciones tiene una importancia relativa en la atención y gestión de los desastres sísmicos, sin embargo, existe consenso en reconocer que los centros de atención de salud y en particular los hospitales *constituyen instalaciones estratégicas en la primera fase de la atención de la emergencia*, donde es considerada la dependencia y conexión entre sistemas. Sin embargo, la contribución de otras instalaciones calificadas como esenciales pueden jugar un papel determinante en la definición del riesgo sísmico a escala urbana, sub-regional y regional.

La importancia relativa de cada instalación está íntimamente ligada a la función que desempeña en la atención de la emergencia sísmica y posterior recuperación. Sin embargo, esta función queda condicionada al grado de interrelación con otras instalaciones esenciales, de manera que la identificación y jerarquización de su importancia relativa implica un problema complejo que debe ser enfocado de manera integral a través del concepto de vulnerabilidad sistémica.

La Fig. 7.2., esquematiza los diferentes niveles de interrelación entre algunas edificaciones esenciales en el marco territorial que engloba a una comunidad o centro urbano cuando es sometido a la acción de un evento sísmico. En este caso, las diferentes instalaciones que tienen a su cargo la atención y gestión de los efectos de la crisis sísmica (centros de salud, de atención y gestión de emergencia, etc.) activan dentro de su radio de acción, mecanismos de coordinación para reducir las consecuencias del evento.

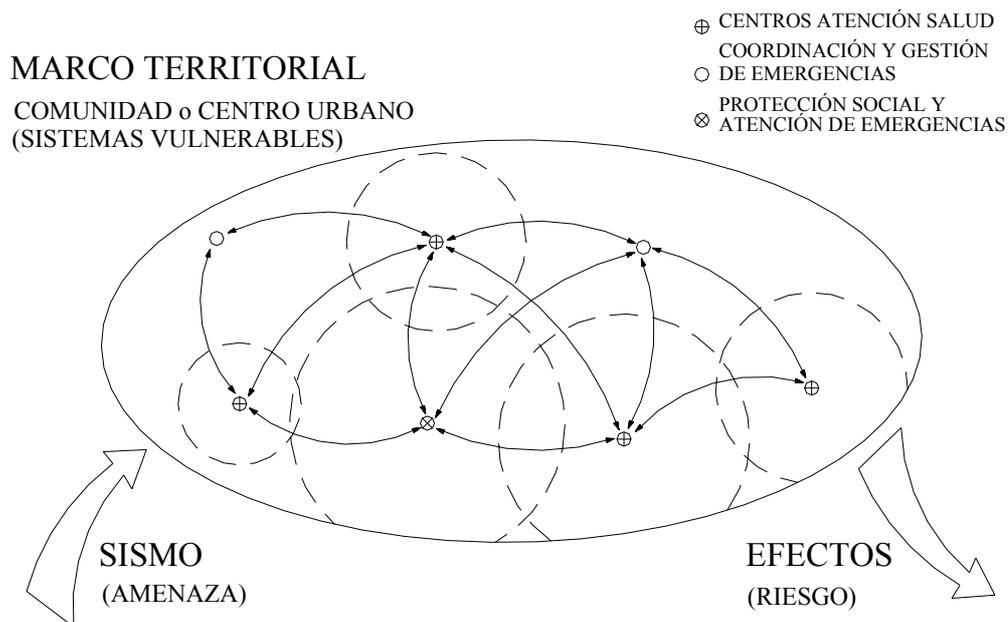


Fig. 7.2. Interrelación entre edificaciones esenciales durante una crisis sísmica

7.5. NATURALEZA Y OBJETIVOS DEL ESTUDIO

Para la definición de la naturaleza y objetivos de un estudio de vulnerabilidad sísmica de edificaciones esenciales y la evaluación de la contribución al riesgo sísmico de una comunidad, es importante clarificar el contexto que sirve de fundamento a su desarrollo, diferenciando los escenarios sísmicos de la evaluación. En particular, interesa considerar dos escenarios fundamentales; antes y después de un sismo.

Antes de la ocurrencia de un sismo, todas las acciones deben estar orientadas a la mitigación de los posibles efectos del sismo sobre las edificaciones, su funciones y la seguridad de sus ocupantes y equipos, para lo cual es imprescindible identificar, clasificar, jerarquizar y diagnosticar el estado de las edificaciones esenciales, caracterizar su respuesta dinámica y cuantificar su capacidad estructural y eventual necesidad de intervención estructural, no estructural e inclusive funcional. Para el desarrollo de estos objetivos, normalmente se cuenta con “suficiente tiempo” pero muy pocos recursos, de manera que deben ser invertidos racional y eficientemente con estrategias apropiadas de evaluación.

Después de la ocurrencia de un sismo, todas las acciones deben estar orientadas a la reducción de las consecuencias del mismo, para minimizar el impacto y los niveles de pérdida asociados. La activación de los planes de emergencia y contingencia, parten del supuesto que la infraestructura de atención, coordinación y gestión de emergencia, así como los servicios básicos, estén disponibles y funcionales. Por lo tanto, esta fase requiere de respuestas “rápidas y confiables”, que permitan evaluar las condiciones de habitabilidad y funcionalidad de las instalaciones afectadas, establecer medidas preventivas de ocupación, capacidades disponibles y toma de decisiones racionales. Para las edificaciones afectadas es necesario cuantificar los niveles de degradación de su capacidad resistente y la eventual necesidad de intervención y reforzamiento estructural.

El éxito de los objetivos planteados en cada uno de estos escenarios dependerá en buena parte del estado del conocimiento disponible sobre el grado de vulnerabilidad del sistema expuesto. Ello exige, además de la definición del marco territorial sobre el cual realizar la evaluación, identificar las diferentes instalaciones esenciales y su interrelación con otros sistemas, a los fines de jerarquizarlas de acuerdo a su importancia relativa y evaluar su vulnerabilidad conforme a criterios específicos compatibles con la naturaleza e importancia que le merece.

Esta simple disertación pone de manifiesto la necesidad de establecer metodologías racionales y estrategias de evaluación de la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones esenciales, con diferentes niveles de aproximación y por ende, diferentes velocidades de respuestas, en escenarios anteriores y posteriores a la ocurrencia de una crisis sísmica, que permitan responder a los diferentes objetivos planteados, dependiendo de la situación considerada.

La Tabla 7.2., resume algunos de los principios básicos que deben servir de base para la definición de las estrategias de evaluación. En la misma se plantea para cada escenario de interés (antes y después del sismo) y en tres niveles de aproximación (fases de evaluación) algunas de las acciones o directrices sobre las cuales se debe enmarcar cualquier estrategia de evaluación de la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones esenciales.

Así por ejemplo, antes de la ocurrencia del sismo, es importante iniciar con un programa de evaluación desarrollado sobre la base de un esquema de inspección y supervisión que permita el diagnóstico del estado físico-funcional de cada edificación a los fines de facilitar una clasificación y jerarquización preliminar que permita de manera racional dar paso a programas de evaluación más detallados desarrollados sobre la base de procedimientos experimentales y analíticos que permitan caracterizar la respuesta estructural a través de ensayos y cuantificar su capacidad estructural con miras a evaluar la necesidad de un posible reforzamiento estructural como parte de un programa de mitigación del riesgo sísmico.

De manera análoga, después de la ocurrencia de un sismo, debe implementarse de manera inmediata un programa de inspección y supervisión que permita evaluar las condiciones de habitabilidad y funcionalidad de las instalaciones y de ser necesario, la implementación de medidas preventivas y toma de decisiones sobre la factibilidad de la continuidad de sus operaciones. Sobre la base de este diagnóstico preliminar, es necesario desarrollar evaluaciones más detalladas a través de técnicas experimentales y teórico-analíticas que permitan cuantificar los niveles de degradación de la capacidad resistente, estimar la capacidad remanente y la necesidad de implementar algún esquema de reforzamiento estructural de tipo forense.

Es evidente que la aplicación sistemática de una metodología basada en estos principios es un proceso lento y costoso, pero definitivamente necesario. Para su implementación de manera racional y eficiente resulta imprescindible establecer apropiadas estrategias de evaluación. En este sentido, es necesario sentar las bases para la racionalización de su implementación y homogeneizar de criterios que permitan alcanzar decisiones coherentes con el nivel de riesgo que caracteriza la realidad de una comunidad específica de conformidad con los niveles de sismicidad de cada región.

Tabla 7.2. Principios para la definición de las estrategias de evaluación

Fase	Evaluación	Escenario	
		Antes del sismo	Después del sismo
A	Inspección Supervisión	- Diagnóstico del estado físico-funcional de la edificación. - Clasificación y Jerarquización.	- Evaluar condiciones de habitabilidad y funcionalidad. - Establecer medidas preventivas y toma de decisiones.
B	Experimental	- Caracterizar la respuesta estructural a través de ensayos de dinámica experimental.	- Cuantificar experimentalmente los niveles de degradación de capacidad.
C	Teórico-Analítico	- Cuantificar la capacidad estructural. - Evaluar la necesidad de un posible reforzamiento estructural (mitigación)	- Evaluar la nueva capacidad estructural. - Propuesta de reforzamiento estructural.

7.6. ESTRATEGIA DE EVALUACIÓN

La implementación de un estudio de riesgo sobre la base del enfoque de vulnerabilidad sistémica requiere la definición de una estrategia de evaluación que permita racionalizar su aplicación a los diferentes escenarios de conformidad con las características de los sistemas y elementos involucrados.

La calificación del desempeño sísmico del sistema debe estar relacionada con la importancia relativa de cada uno de los elementos integrantes, los niveles de amenaza de la región y el desempeño sísmico de dicha instalación. Esto implica que el nivel de esfuerzo o recursos necesarios para la caracterización de cada uno de los elementos involucrados debe estar en proporción a estas cualidades. Si bien, la vulnerabilidad sísmica es una propiedad intrínseca de la estructura, la definición de la naturaleza y alcance de un estudio de vulnerabilidad, debe estar condicionado por el nivel de amenaza sísmica existente. En principio, se deben promover estudios exigentes en zonas de elevada amenaza y estudios menos exigentes en zonas de moderada amenaza. Este principio debe estar modulado por la importancia del elemento y su desempeño sísmico, sin olvidar que las decisiones finalmente están relacionadas con el riesgo y no sólo con la vulnerabilidad.

Para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones esenciales y su contribución al riesgo sísmico, la estrategia de evaluación propuesta parte de una clasificación de las edificaciones esenciales según la importancia relativa de la función que desempeña y la amenaza regional, que servirán de base para definir el nivel de evaluación mínimo deseable en correspondencia con el desempeño sísmico de la instalación. Aunque la estrategia propuesta está principalmente concebida para definir acciones antes de la ocurrencia de un evento desastroso (orientada hacia la mitigación), esta plataforma también puede servir de base para la evaluación post-sísmica.

A continuación se presentan los criterios de clasificación propuestos en el marco del presente trabajo que van a permitir decidir acerca del nivel de evaluación requerido por las edificaciones esenciales.

7.6.1. Clasificación de las edificaciones esenciales según la importancia relativa de la función que desempeña

A los fines de priorizar los estudios de vulnerabilidad y riesgo sísmico se propone la siguiente clasificación de las edificaciones esenciales en tres categorías o niveles de importancia relativa: *básica, alta y muy alta*.

Importancia básica: Instalaciones que prestan un servicio ordinario, convencional, genérico (no especializado) y que atienden comunidades limitadas.

Importancia alta: Instalaciones que prestan además del servicio básico, un servicio especializado limitado. Constituyen centros de referencia de los centros de importancia básica y tienen una moderada área de influencia demográfica.

Importancia muy alta: Aquellas instalaciones especialmente importantes o imprescindibles en la atención de una emergencia, con una significativa área de influencia demográfica.

Esta clasificación no pretende subestimar la importancia relativa de una edificación frente a otra, pues debe reconocerse que en cada comunidad existen diversas edificaciones esenciales que juega un papel fundamental en el acontecer cotidiano y sobre todo en la atención de cualquier emergencia. Esta clasificación se dice relativa, porque toma como base la función de cada una de las edificaciones en un contexto regional, donde lo que se persigue es calificar la respuesta del sistema y no de sus elementos individuales.

Siguiendo el esquema de clasificación de establecimientos de atención médica del sector público (GORV, 1983) adoptado por la norma venezolana para edificaciones sismorresistentes (FUNVISIS, 2001), así como el esquema de clasificación de las unidades básicas de salud propuestas por el servicio catalán de salud en función de las características del servicio prestado (SCS, 1996b), la Tabla 7.3., describe una propuesta de clasificación según la importancia relativa de la función que desempeñan algunas de las instalaciones esenciales que forman parte de los principales sistemas y sub-sistemas de un centro urbano, adaptada y ampliada de acuerdo a los parámetros manejados dentro del marco del presente trabajo. En la misma se identifican cuatro de los principales sistemas esenciales de un centro urbano (sanitario, educacional, gubernamental y de servicios de emergencia); para cada uno de ellos se propone un criterio que permite discriminar la importancia relativa de la función que desempeñan sus elementos integrantes.

Así por ejemplo, para el sistema sanitario se clasifican como instalaciones de importancia básica, los centros de atención primaria (CAP), los ambulatorios, puestos de socorro, etc., mientras que los hospitales generales con menos de 60 camas de hospitalización se clasifican como instalaciones de alta importancia y aquellos hospitales generales con más de 60 camas así como los hospitales de referencia o de especialización se clasifican como instalaciones de muy alta importancia.

Tabla No. 7.3. Clasificación de las edificaciones esenciales según la importancia relativa de la función que desempeña

<i>Sistema y Sub-sistemas</i>	<i>Importancia Relativa</i>		
	<i>Básica</i>	<i>Alta</i>	<i>Muy alta</i>
Sanitario o de la Salud	Centros Atención Primaria (CAP), Ambulatorios, Puestos de socorro	Hospitales Generales con menos de 60 camas de hospitalización	Hospitales de Referencia o de Especialización. Hospitales generales con más de 60 camas.
Educacional	Centros educativos con capacidad menos de 50 personas	Centros educativos con capacidad entre 50 y 200 personas	Centros educativos con capacidad mayor de 200 personas
Gubernamentales y/o Municipales	Oficinas públicas y/o municipales	Edificios Gubernamentales	Centros de Control, Gestión y Planificación para la atención de la emergencia.
Servicios de Emergencia	Estaciones secundarias y/o de apoyo	Estación bomberos, policiales. Cuarteles con menos de 100 efectivos	Centrales policiales, bombero y cuarteles o estaciones con más de 100 efectivos.

7.6.2. Clasificación de la amenaza regional

A los fines de jerarquizar los estudios de vulnerabilidad y riesgo sísmico de las edificaciones esenciales se propone la siguiente clasificación de la amenaza regional en dos categorías: *moderada* y *alta*. La Tabla No. 7.4., resume los rangos de valores de intensidad macrosísmica y aceleración máxima asociados a cada nivel de amenaza.

Amenaza moderada: Asociado a una región de moderada sismicidad, donde se espera para un período medio de retorno de aproximadamente 500 años, un grado de intensidad máxima menor o igual que VIII ($I \leq VIII$) en las escalas MSK o MM, o bien, una máxima aceleración horizontal en roca o suelos rígidos menor o igual a 0.15g.

Amenaza alta: Asociada a una región de alta sismicidad, donde se espera para un período medio de retorno de aproximadamente 500 años, un grado de intensidad máxima superior a VIII ($I > VIII$) en las escalas MSK o MM, o bien, una máxima aceleración horizontal en roca o suelos rígidos mayor a 0.15g.

Tabla 7.4. Clasificación de la amenaza regional

<i>Nivel de Amenaza</i>	<i>Intensidad máxima</i>	<i>Aceleración máxima</i>
Moderada (T=500 años)	$\leq VIII$	$\leq 0.15 \text{ g}$
Alta (T=500 años)	$> VIII$	$> 0.15 \text{ g}$

7.6.3. Clasificación de las edificaciones esenciales según el desempeño sísmico

A los fines de jerarquizar los estudios de vulnerabilidad y riesgo sísmico de las edificaciones esenciales se propone la siguiente clasificación del desempeño sísmico en dos categorías: *desempeño sísmico suficiente* y *desempeño sísmico insuficiente*.

Desempeño sísmico suficiente o adecuado: Se refiere a aquellas edificaciones que muestran una capacidad de respuesta satisfactoria, cumpliendo con los objetivos de diseño y los niveles de desempeño esperados durante la atención de una emergencia sísmica. Aquellas donde se mantiene la capacidad de prestar servicios de la manera esperada y donde los niveles de pérdida o perturbación se mantienen dentro de los rangos admisibles o tolerables.

Desempeño sísmico insuficiente o inadecuado: Se refiere a aquellas edificaciones que muestran un nivel de actuación inaceptable, siendo incapaces de cumplir con las funciones previstas en la atención de la emergencia sísmica y donde los niveles de pérdidas o perturbación superan los rangos admisibles o tolerables. Aquellas que no logran alcanzar los objetivos de diseño evidenciando un desempeño sísmico contrario a las exigencias que le impone el sistema.

Esta clasificación debe fundamentarse sobre la base de un índice o indicador del desempeño sísmico definiendo de manera apropiada para cada tipo de instalación y capaz de valorar tanto su función en la atención de la emergencia sísmica, como las propias pérdidas cuando se expone a un determinado nivel de amenaza sísmica. La función de cada instalación depende de su nivel de participación en la atención de la emergencia sísmica y está relacionada con las características del servicio que presta, su capacidad de prestar servicio y la demanda al cual será sujeto. Por lo tanto, dicho indicador debe ser evaluado para cada instalación en el marco de un estudio de la respuesta sísmica del sistema.

7.7. NIVELES DE EVALUACIÓN DE LAS EDIFICACIONES ESENCIALES

A los fines de calificar la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones esenciales y la contribución al riesgo sísmico, se proponen tres niveles de evaluación; *preliminar, general y detallado*. Las principales características de cada uno de estos niveles de evaluación son;

7.7.1. Evaluación preliminar

Tiene su principal aplicación a nivel de un estudio regional. Está orientado a evaluar de manera preliminar, la capacidad de respuesta de un sistema ante una crisis sísmica ya que permite de una manera muy práctica identificar los puntos vulnerables del sistema con miras a jerarquizar y/o priorizar los siguientes niveles de evaluación.

La caracterización de la amenaza y de la vulnerabilidad se fundamenta en parámetros simples de práctica determinación. Sus resultados pueden ser suficientes cuando el estudio involucra instalaciones de importancia relativa básica en regiones de alta sismicidad o instalaciones de importancia relativa alta en zonas de moderada sismicidad. En otras circunstancias, los resultados deben ser considerados como orientativos para la implementación de una evaluación de orden superior, compatible con el nivel de importancia de las instalaciones y la sismicidad de la región.

Para este nivel de evaluación, la amenaza puede ser caracterizada de manera determinística por la intensidad macrosísmica I ó la aceleración máxima del terreno A_{\max} , establecida en un mapa de peligrosidad sísmica o bien, asociada a un escenario sísmico histórico o simulado. La vulnerabilidad de las edificaciones puede ser establecida a través de algún método empírico de categorización, donde la edificación puede ser asociada de

manera determinista a una tipología predefinida T , o de manera probabilista estimando la probabilidad de que pertenezca a una clase o tipología estructural $P[T]$. El daño D , puede ser caracterizado en términos de la probabilidad de alcanzar los diferentes estados o grados de daño $P[D]$. Finalmente, las relaciones intensidad-daño pueden ser expresadas a partir de las matrices de probabilidad de daño MPD o las curvas de fragilidad asociadas CF.

7.7.2. Evaluación general

Constituye un nivel de evaluación superior a la evaluación preliminar, que persigue un diagnóstico más confiable. Aplicable cuando están involucradas instalaciones de importancia relativa alta y muy alta, en regiones de alta y moderada sismicidad, respectivamente. En todo caso, es conveniente que una evaluación general sea precedida por una evaluación preliminar.

La caracterización de la amenaza debe fundamentarse en parámetros sencillos tales como la intensidad macrosísmica, la aceleración máxima del terreno, descritas preferiblemente en términos probabilísticos $P[i \geq I, t]$ - $P[a \geq A, t]$ y el como resultado de un estudio de peligrosidad sísmica. La vulnerabilidad de las edificaciones puede ser establecida a través de algún método empírico de categorización o de identificación y puntaje, de manera que puede ser calificada a través de un índice de vulnerabilidad I_v , o asociada a una tipología pre-establecida estimando la probabilidad de que pertenezca a una clase o tipología estructural $P[T]$. El daño puede ser caracterizado en términos de la probabilidad de alcanzar los diferentes estados o grados de daño $P[D]$. Finalmente las relaciones intensidad-daño pueden ser expresadas a partir de las funciones de vulnerabilidad FV , las matrices de probabilidad de daño MPD o las curvas de fragilidad asociadas CF.

Aunque se admite el uso de los métodos empíricos de categorización para la caracterización de la vulnerabilidad de las edificaciones, se destaca la importancia que se utilicen como base para la definición de las tipologías estructurales la mayor cantidad posible de atributos de las edificaciones definidos sobre la base de las características de las construcciones prevalecientes en la región. En caso de no contarse con estudios específicos en esta materia, es preferible la utilización de métodos de identificación y puntaje, capaces de calificar de manera más precisa las deficiencias estructurales relevantes. Asimismo, la exigencia del tratamiento probabilístico de la amenaza constituye una de sus principales diferencias con la evaluación preliminar.

7.7.3. Evaluación detallada

Este nivel de evaluación persigue el diagnóstico más confiable posible del desempeño de las edificaciones esenciales. Implica la aplicación de importantes recursos y tiempo, por lo que su implementación se justifica cuando se trata de instalaciones con una importancia relativa muy alta en regiones caracterizadas por una alta sismicidad e inclusive en regiones de moderada sismicidad, cuando se trata de edificaciones especialmente importantes. Aunque constituye el máximo nivel de evaluación es conveniente que sea precedida de una evaluación preliminar y general, que permita racionalizar y jerarquizar el empleo de estos recursos.

La caracterización de la amenaza debe fundamentarse en parámetros más representativos de la severidad del movimiento sísmico, capaces de reproducir los efectos

estructurales, sobre todo en el rango de respuesta no lineal, tales como, los acelerogramas, los espectros de respuesta, los espectros de energía, etc., que sirven de base para la estimación de la demanda sísmica. La vulnerabilidad de las edificaciones debe ser evaluada a través de algún método analítico o teórico, desarrollado sobre la base de modelos mecánicos de dinámica estructural, capaz de reproducir la capacidad de respuesta de la estructura, sobre todo en el rango no lineal. Es conveniente que esta evaluación sea complementada con algún método experimental desarrollado sobre la base de ensayos dinámicos, orientados a calibrar los resultados obtenidos. La implementación de estos métodos permitirá caracterizar el daño a través de indicadores o índices de daño ID. La vulnerabilidad sísmica será el resultado de una extensiva evaluación sísmica que requerirá la aplicación de procedimientos de análisis capaces de calificar el nivel de desempeño sísmico de la edificación ND. En este sentido y dado la practicidad de su implementación, destacan los métodos simplificados de análisis estático no lineal y en particular, el método del espectro capacidad-demanda ECD.

La Tabla 7.5. resume algunos de los parámetros característicos descritos y asociados a los diferentes niveles de evaluación propuestos y convencionalmente empleados para caracterizar la amenaza, el daño y la vulnerabilidad.

Tabla 7.5. Parámetros característicos según el niveles de evaluación empleado

	<i>Nivel de Evaluación</i>		
	<i>Preliminar</i>	<i>General</i>	<i>Detallado</i>
<i>Amenaza o Peligrosidad</i>	Intensidad Macrosísmica – I Aceleración máxima del terreno - A_{max}	Intensidad Macrosísmica - $P[i \geq I, t]$ Aceleración máxima del terreno - $P[a \geq A, t]$	Espectro de respuesta Espectro de energía Acelerogramas
<i>Daño</i>	Estados o grados de Daño - $P[D]$	Estados o grados de Daño - $P[D]$ Índices de Daño - ID	Índice de Daño – ID Nivel de Desempeño - ND
<i>Evaluación de la vulnerabilidad Sísmica</i>	Empírico: Categorización $P[T]$	Empírico: Categorización $P[T]$ Identificación y Puntaje - I_v	Analíticos y Experimentales (Método espectro Capacidad-Demanda)
<i>Vulnerabilidad Sísmica</i>	Matrices de probabilidad de daño - $MPD: P[D I, T]$ Curvas de fragilidad - $CF: f(d I, T)$	$MPD: P[D I, T]$ $CF: f(d I, T)$ Funciones de Vulnerabilidad - FV $FV: f(ID I, I_v)$	Espectro Capacidad Demanda – ECD Nivel de Desempeño Esperado - NDE

7.7.4. Nivel de evaluación recomendable

Sobre la base de los diferentes niveles de evaluación propuestos, la Tabla 7.6., resume el nivel de evaluación *mínimo* requerido o recomendable para las edificaciones esenciales, dependiendo de la importancia relativa de su función, el nivel de sismicidad regional y el desempeño sísmico de la edificación.

Tabla 7.6. Nivel de evaluación mínimo requerido para las edificaciones esenciales

Nivel de Amenaza	Desempeño Sísmico	Importancia Relativa		
		Básica	Alta	Muy Alta
Moderada	Suficiente	1	1	2
	Insuficiente	1	2	3
Alta	Suficiente	1	2	3
	Insuficiente	2	3	3

1. Evaluación Preliminar

2. Evaluación General

3. Evaluación Detallada

Para alcanzar los niveles de evaluación mínimos recomendables es necesario un proceso de *aproximaciones sucesivas*, de manera que, partiendo de una evaluación preliminar para todos los elementos integrantes del sistema en estudio, los resultados de la evaluación del modelo regional permitirán una primera jerarquización, que facilitará la toma de algunas decisiones inminentes e inclusive implementar algunas intervenciones. Además permitirá calificar, al menos de manera preliminar, el desempeño sísmico de cada uno de estos elementos.

La evolución del proceso depende del nivel de amenaza sísmica de la región, tal como se indica en las flujogramas descritos a continuación. En zonas de moderada sismicidad (Fig. 7.3.), se requiere alcanzar un nivel de evaluación general para aquellas edificaciones de importancia relativa alta que muestren un desempeño sísmico insuficiente y para todas las edificaciones de importancia muy alta aunque muestren un desempeño suficiente. Sobre la base de esta información actualizada, una nueva evaluación del modelo regional permitirá afinar los criterios de jerarquización y la toma de algunas decisiones complementarias, sin embargo, las decisiones finales deben soportarse sobre la base de una evaluación definitiva del modelo regional que contemple un nivel de evaluación detallada para aquellas edificaciones de importancia relativa muy alta que experimenten un desempeño sísmico insuficiente.

En zonas de alta sismicidad (Fig. 7.4.), se requiere alcanzar un nivel de evaluación general, para aquellas edificaciones de importancia relativa básica que muestren un desempeño sísmico insuficiente y para todas las edificaciones de importancia relativa alta aunque muestren un desempeño suficiente. Sobre la base de esta información actualizada, una nueva evaluación del modelo regional permitirá afinar los criterios de jerarquización y la toma de algunas decisiones complementarias, sin embargo, las decisiones finales deben soportarse sobre la base de una evaluación definitiva del modelo regional que contemple un nivel de evaluación detallada para aquellas edificaciones de importancia relativa alta o muy alta que experimenten un desempeño sísmico insuficiente e inclusive para las edificaciones de importancia relativa muy alta que experimenten un desempeño sísmico suficiente.

La evaluación del modelo regional en cada iteración implica una aplicación racional de recursos fundamentada en una estrategia clara de evaluación que permite de una manera eficiente emprender una jerarquización de los niveles de riesgo de cada una de las edificaciones esenciales que conforma el sistema en estudio y justifica la toma de decisiones y la implementación de intervenciones que pueden ser concebidas dentro de un programa de corto, medio y largo plazo. La evolución del proceso debe continuar hasta que las intervenciones y decisiones permitan alcanzar un desempeño aceptable del sistema; esto es, que cada uno de sus elementos integrantes pueda satisfacer el nivel de desempeño esperado. Ello implica que debe definirse con antelación las condiciones bajo las cuales se considera que el desempeño de un sistema es aceptable.

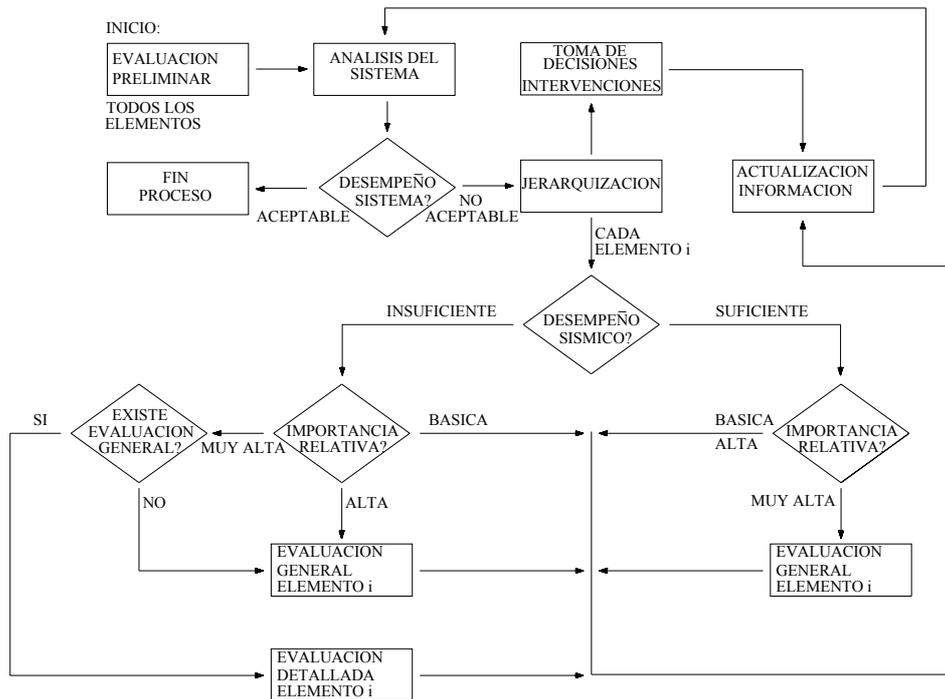


Fig. 7.3. Estrategia de evaluación en zonas de moderada sismicidad

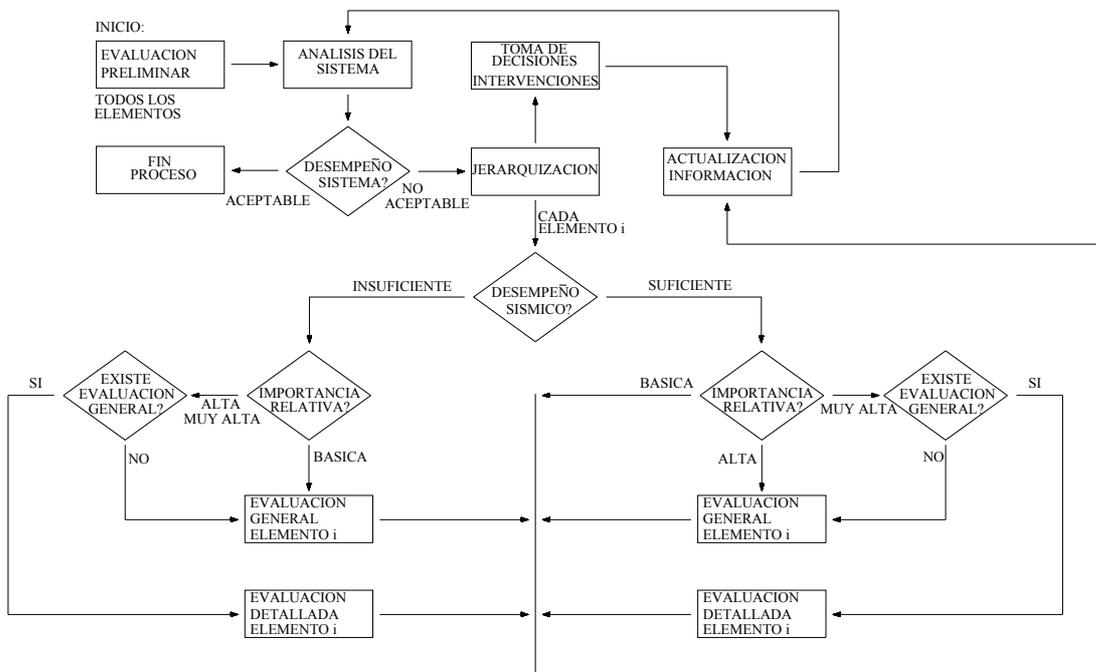


Fig. 7.4. Estrategia de evaluación en zonas de alta sismicidad

7.8. RESUMEN Y DISCUSIÓN

La extensión de los conceptos relacionados con sistemas al campo del estudio del riesgo sísmico constituye un enfoque bastante conveniente ya que permite incorporar a los sistemas como componentes del riesgo en sí mismo y ampliar el marco de referencia del estudio al considerar los diferentes niveles de interrelación entre los diversos sistemas destinados a la atención de una emergencia sísmica. Este enfoque conocido como *vulnerabilidad sistémica*, integra para un ámbito territorial de afectación, la vulnerabilidad física, organizacional y sistemática de los diferentes elementos y sub-sistemas susceptibles de ser dañados por la acción de un evento sísmico. De allí la importancia de identificar, para diferentes escalas territoriales, las características de los diversos sistemas y sus niveles de interrelación, para determinar la vulnerabilidad sísmica de los elementos que le integran y su contribución al riesgo sísmico.

Las edificaciones esenciales conforman los llamados sistemas esenciales de atención a la emergencia sísmica. En este caso, cada instalación tiene una importancia relativa en la atención y gestión de los desastres sísmicos, destacándose los centros de atención de la salud y los hospitales pues constituyen instalaciones estratégicas en la primera fase de atención de la emergencia. Sin embargo, la actuación de otras instalaciones en las fases de atención y recuperación puede ser determinante, de manera que la identificación y jerarquización de la importancia relativa implica un problema complejo que debe ser enfocado de una manera integral a través de enfoques novedosos, como el de vulnerabilidad sistémica.

La implementación del enfoque de vulnerabilidad sistémica al estudio de la vulnerabilidad sísmica de edificaciones esenciales y su contribución al riesgo sísmico debe estar dirigida por un conjunto de principios básicos que permitan, mitigar los posibles efectos de un sismo probable y reducir las consecuencias debidas a un sismo específico, dentro de los llamados escenarios anterior y posterior a un desastre sísmico. Su aplicación representa un proceso lento y costoso, pero necesario por lo que resulta imprescindible establecer estrategias de evaluación que permitan alcanzar de manera racional y eficiente el objetivo planteado.

La estrategia de evaluación propuesta parte de una clasificación de las edificaciones esenciales según su importancia relativa, el nivel de amenaza regional y el desempeño sísmico de la instalación. Tres categorías o niveles de importancia relativas han sido propuestos; importancia básica, alta y muy alta, sobre la base de la función de la edificación en el contexto territorial. Asimismo, dos niveles de amenaza sísmica asociados a regiones de moderada y alta sismicidad y dos categorías del desempeño sísmico de la edificación; desempeño sísmico suficiente e insuficiente relacionadas con la actuación de la instalación en la atención de la emergencia sísmica. Sobre la base de esta clasificación, se establecen tres niveles de evaluación; preliminar, general y detallado que permiten abordar con diferentes niveles de confiabilidad la evaluación sísmica de cada una de estas instalaciones. Para cada nivel de evaluación se describen algunos de los parámetros que pueden servir de base para caracterizar la amenaza o peligrosidad, el daño o afectación, así como los métodos de evaluación de la vulnerabilidad sísmica y su caracterización. Asimismo, se establecen los niveles de evaluación mínimos recomendables para edificaciones esenciales, conforme a su clasificación de acuerdo a su importancia relativa, nivel de exposición y desempeño sísmico.

La calificación de la capacidad de respuesta sísmica de un sistema es el resultado de un proceso de aproximaciones sucesivas donde existe un compromiso entre la toma de decisiones y los niveles de riesgo admisibles o tolerables. Partiendo de una evaluación preliminar de todos los elementos que conforman el sistema, el análisis a través de un modelo de respuesta permite jerarquizar los niveles de riesgo de cada una de las instalaciones involucradas en la evaluación tomar decisiones preliminares de intervención y evaluar su desempeño sísmico, lo cual servirá de base para definir las nuevas exigencias de las evaluaciones posteriores, para alcanzar según sea el caso, niveles de evaluación general o detallada que permitan mejorar en las siguientes iteraciones del proceso de aproximaciones sucesivas la predicción de la respuesta global del sistema y particular de cada uno de sus elementos integrantes, racionalizando la aplicación de tiempo y recursos.

Las diferentes etapas del proceso permiten establecer los niveles de contribución al riesgo sísmico de cada una de las edificaciones y determinan una clara línea de acción que puede ser implementada en programas de corto, mediano y largo plazo, dirigidos a reducir los niveles de riesgo sísmico de una manera sistematizada, racional y eficiente.