

CAPÍTULO 8

DESEMPEÑO SÍSMICO DEL SISTEMA SANITARIO REGIONAL

8.1. INTRODUCCIÓN

Reconociendo el hecho que las instalaciones de salud y en particular los hospitales, constituyen instalaciones estratégicas en la primera fase de la atención de la emergencia sísmica, y que el sistema de atención a la salud, referido como *sistema sanitario*, representa uno de los principales sistemas esenciales que contribuye de manera significativa a modular el riesgo sísmico de una comunidad, en el presente capítulo se desarrolla un modelo para la evaluación de la respuesta sísmica del sistema sanitario regional fundamentado en el enfoque de vulnerabilidad sistémica donde se reconoce de manera explícita su nivel de interrelación con otros sistemas, específicamente, los sistemas de comunicación y vialidad.

Para el análisis de la contribución de la vulnerabilidad sísmica del sistema sanitario al riesgo sísmico de una región, es necesario ante todo, caracterizar apropiadamente el sistema, definiendo todos y cada uno de sus elementos integrantes y contar con una apropiada descripción geográfica de los sistemas interrelacionados; esto es, establecer la distribución de población, de los centros de atención de la salud, de la vialidad y los sistemas de comunicación, sobre la base de la unidad geográfica básica de información.

La evaluación del desempeño sísmico del sistema sanitario se fundamenta en la determinación de la capacidad de atención de heridos de los hospitales que conforman el sistema y la disponibilidad de camas capaces de atender los heridos. Desde este punto de vista, la emergencia queda satisfecha cuando todos los heridos son apropiadamente hospitalizados y atendidos. En este esquema básico propuesto, para modelar el flujo de pacientes se necesita conocer dos aspectos fundamentales; la capacidad del sistema hospitalario y la demanda de sus servicios. El conocimiento de la demanda requiere un análisis del número de víctimas esperado en función de la severidad del sismo y su localización geográfica. El conocimiento de la capacidad hospitalaria requiere un estudio del número de camas disponibles una vez ocurrido el evento sísmico, en función de la vulnerabilidad física y funcional de la edificación. Finalmente, el flujo de pacientes hacia los centros hospitalarios depende de la vialidad, la capacidad de comunicación y/o gestión de la emergencia, mientras que la capacidad residual de los hospitales depende del funcionamiento de otras líneas vitales como por ejemplo la energía eléctrica, el agua potable, entre otras.

Este capítulo propone un modelo de gestión del flujo de heridos basado en la caracterización de la capacidad, la demanda y su evolución temporal. Desarrolla una aplicación del enfoque de vulnerabilidad sistémica propuesto al principal sistema de edificaciones esenciales, *el sistema sanitario regional*. Se implementa un modelo para la evaluación de la respuesta sísmica del sistema sanitario a escala regional. Para su cuantificación, se introducen una serie de índices de desempeño del sistema y de los hospitales que sirven como base para discernir sobre su situación relativa y el nivel de contribución al riesgo sísmico de cada uno de estos elementos. La evaluación se desarrolla sobre la base de tres tipos de estudios designados como; estudio de escenarios, estudio de pérdidas potenciales y análisis de riesgo.

El objetivo principal de este capítulo es desarrollar las bases de un primer modelo de evaluación del desempeño sísmico del sistema sanitario regional que servirá más adelante de base para su aplicación al sistema sanitario de Cataluña en particular.

8.2. APLICACIÓN DEL ENFOQUE DE VULNERABILIDAD SISTÉMICA AL ESTUDIO DEL SISTEMA SANITARIO REGIONAL

8.2.1. Los sistemas esenciales: El sistema sanitario

Las edificaciones esenciales constituyen elementos expuestos que agrupados de acuerdo a sus funciones específicas integran los llamados *sistemas esenciales de atención a la emergencia sísmica*. Cada una de estas edificaciones esenciales tiene una importancia relativa en la atención y gestión de los desastres sísmicos, sin embargo, existe consenso en reconocer que las instalaciones de salud y en particular, los hospitales, constituyen instalaciones estratégicas en la primera fase de la atención de la emergencia, representando un buen punto de partida para el desarrollo de estas metodologías de evaluación donde se considera la dependencia y conexión entre sistemas (EC-SERGISAI, 1998).

El sistema de atención a la salud, tradicionalmente referido como *sistema sanitario*, representa uno de los principales sistemas esenciales, razón por la cual será utilizado como base para la aplicación del enfoque de *vulnerabilidad sistémica* desarrollado en este estudio.

8.2.2. Justificación del estudio

La aplicación del enfoque de vulnerabilidad sistémica al estudio de la respuesta sísmica del sistema sanitario regional debe ante todo tener presente que el sistema sanitario está conectado íntimamente o de manera directa con otros sistemas y líneas vitales tales como la vitalidad y la comunicación. La capacidad que tiene el sistema sanitario de continuar proporcionando sus servicios bajo condiciones extremas depende tanto de los niveles de interrelación entre sistemas (vulnerabilidad sistemática) como de su propia vulnerabilidad física y organizacional, ya que la capacidad de prestar servicio está íntimamente ligada al grado de daño físico que haya sufrido la estructura, los elementos no estructurales e inclusive el equipamiento médico (vulnerabilidad física) y la reducción de su capacidad de respuesta, coordinación y cooperación (vulnerabilidad organizacional). (Zonno, 1998).

Para el estudio del riesgo sísmico a una determinada escala territorial, no todos los parámetros pueden ser evaluados sobre la base de una misma área referencial; así por ejemplo, no tiene sentido evaluar sólo el comportamiento aislado de los hospitales y otras infraestructuras sanitarias situadas en el área epicentral, en su lugar es conveniente estudiar el comportamiento sistemático y organizacional de todas las instalaciones sanitarias que estén dentro de un radio de acción razonable, al alcance del área donde se concentre el mayor grado de daños físicos y a los cuales es posible tener acceso relativamente rápido; por ejemplo, en menos de 2 a 3 horas. De hecho, la estructuración del sistema sanitario, generalmente conforma las llamadas *redes hospitalarias*, cuyo funcionamiento en condiciones ordinarias precisan un nivel de interdependencia entre los centros hospitalarios que permiten cubrir las necesidades por regiones, de manera que estas redes hospitalarias tendrán un impacto relevante a nivel local, sub-regional y regional. Esta situación pone en

evidencia una clara interrelación entre el desempeño sísmico de las instalaciones sanitarias situadas en el área epicentral, con las instalaciones situadas en las áreas periféricas que conjuntamente convergen en la atención de la emergencia sísmica y que puede extenderse hasta alcanzar un ámbito regional, interactuando con los sistemas de infraestructura asociados a las líneas vitales y vialidad (EC-SERGISAI, 1998).

En términos cuantitativos, la decisión sobre la capacidad que tiene el sistema sanitario de continuar proporcionando sus servicios convencionalmente se enfoca en términos de la relación demanda-capacidad de unidades de cuidado o “camas”. Esto implica un exhaustivo conocimiento de la capacidad instalada en los hospitales, su ubicación y características de uso, a los fines de estimar la capacidad efectiva para la atención de una situación de emergencia, la cual está relacionada con la vulnerabilidad del sistema y que servirá de base para su comparación con la demanda del servicio debido a los efectos del desastre sísmico (OPS, 1993).

Como ejemplo, la Fig. 8.1., muestra la conexión existente entre los hospitales y otros sistemas (líneas vitales, vialidad, etc.), así como su influencia sobre la relación demanda-capacidad de unidades de cuidado. Según este esquema, la vulnerabilidad de los hospitales determina la cantidad de unidades de cuidado disponibles o capacidad efectiva, mientras que la demanda de unidades de cuidado depende del número de personas afectadas por los daños físicos en edificios u otras instalaciones. Se observa la dependencia de los hospitales al funcionamiento de las líneas vitales y especialmente de los servicios de agua y energía en los casos de ausencia de fuentes autónomas de suministro. Asimismo la dependencia de la vialidad, que puede ser obstruidas por deslizamientos de laderas o colapso y fallo de puentes, etc.

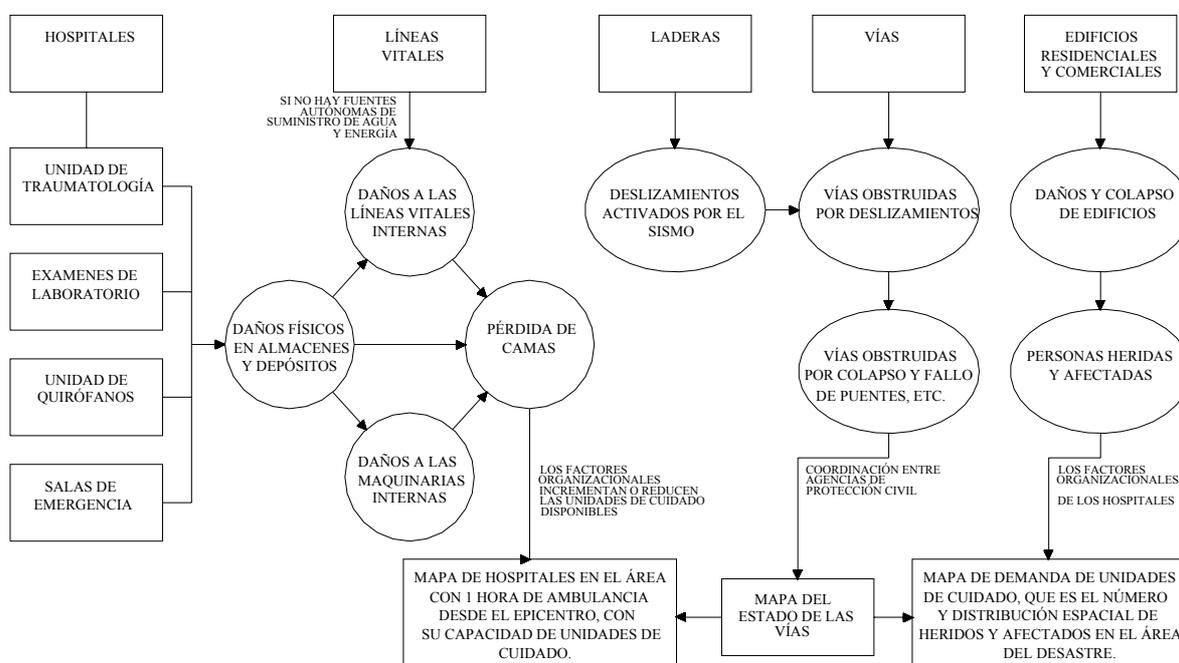


Fig. 8.1. Conexión entre los hospitales y otros sistemas (Tomada EC-SERGISAI, 1998)

En síntesis, la evaluación de la capacidad de respuesta del sistema sanitario regional, en primer nivel, se puede simplificar mediante el análisis de tres variables:

1. El número de camas disponibles (capacidad)
2. El número de camas necesarias o de heridos que hay que hospitalizar (demanda)
3. El tiempo de viaje de los heridos a los hospitales.

El número de camas disponibles requiere el mapa de hospitales con su capacidad residual después del sismo. El número de heridos requiere un mapa de distribución geográfica del daño causado por el sismo sobre la población. Finalmente, el tiempo de viaje requiere información sobre las características de la vialidad.

A este sencillo esquema, que se utilizará en la aplicación de este estudio, se le puede añadir de forma práctica y natural otros aspectos como el estado de la vialidad y de comunicación después del sismo, especialmente la capacidad de mantener una comunicación “on line” sobre la evolución espacio-tiempo del binomio capacidad-demanda que revierta de forma instantánea el flujo de heridos hacia hospitales cuya capacidad no ha sido saturada.

8.2.3. Descripción del Sistema Sanitario Regional

Para el análisis de la contribución de la vulnerabilidad del sistema sanitario al riesgo sísmico a una determinada escala territorial, es indispensable contar con información geográfica y censos actualizados de población que describan la distribución de la población y de los centros de atención de la salud así como la accesibilidad a cada uno de ellos y los recursos disponibles. Para cada centro, es necesario conocer además de las características particulares de sus instalaciones, su capacidad instalada, en términos del número de camas disponibles, el tipo de servicio que puede brindar, así como su coeficiente medio de ocupación¹, y la población que el centro de salud pretende atender dentro de su propio entorno, descritas a través de las llamadas isocronas² (Nutti y Vanzi, 1999).

A continuación se describen los tres bloques de información necesarios para abordar el estudio de un sistema sanitario regional que caracterizan la demanda, la capacidad y el sistema vial.

8.2.3.1. Información de la población

Establecida la escala geográfica de evaluación, es necesario ante todo definir la *unidad geográfica básica de información*, sobre la cual se precisa conocer los detalles de los elementos expuestos y su distribución sobre el territorio, que permitirá establecer, la distribución espacial de heridos y afectados en el área del desastre, asociado a la demanda potencial del sistema sanitario debido a la ocurrencia de un sismo.

Por ejemplo, para una evaluación a escala regional, suele emplearse como unidad geográfica básica de información los *municipios*, por ser entidades sobre las que

¹ Se entiende por *coeficiente medio de ocupación*, la relación entre el número de pacientes ordinarios o en condiciones de funcionamiento normal y el número nominal de camas existentes. En condiciones normales, es recomendable que esta relación no sea mayor que el 70%

² Las *isocronas*, son curvas que describen la población que el centro de salud atiende, en términos de distancia ciudadano-centro de salud. En general, se recomienda que estas distancias sean lo menor posible.

generalmente se conoce con suficiente precisión, los detalles de población, edificaciones existentes y servicios. Sobre la base de esta información, es posible estimar las personas afectadas por daños físicos en edificios u otras instalaciones, que demandaran unidades de cuidado del sistema sanitario en una situación de emergencia sísmica.

Utilizando los Municipios como unidad geográfica básica de información, la información de la población que se requiere conocer para cada Municipio será;

- Datos de identificación del municipio; nombre, código, comarca, etc.
- Número de habitantes o población del Municipio.
- Número de edificaciones y densidad media de ocupación por edificio.
- Clasificación de las edificaciones según las clases de vulnerabilidad.
- Centro hospitalario que cubre sus necesidades ordinarias ó centro de referencia.
- Tiempo medio de traslado desde el municipio al centro hospitalario de referencia.

Los tres primeros parámetros generalmente son proporcionados por las oficinas de locales de estadística y deben estar referidos a los últimos censos disponibles de la población. La clasificación según las clases de vulnerabilidad, exige un proceso previo de calificación de las edificaciones, que debe seguir criterios de simple aplicación, fundamentados en parámetros de fácil obtención, como los aportados por las oficinas locales de catastro, tales como, altura, año de construcción, ubicación, etc.

El centro hospitalario que cubre las necesidades de cada municipio generalmente se establece de acuerdo a la planificación de los servicios sanitarios de cada región y son proporcionados por las oficinas sanitarias locales de planificación y logística. Los tiempos medios de traslados en condiciones ordinarias dependen de la vialidad existente y el tipo de vialidad. La vialidad entre un municipio y el centro de referencia puede variar en característica y longitud; su tipología condicionará la velocidad de transporte y los tiempos de traslado.

8.2.3.2. Información de los hospitales

La localización de los hospitales generalmente sigue la distribución de la población. Para cada uno de estos centros, es necesario conocer además de las características particulares de sus instalaciones, su capacidad en término de unidades de cuidado, el tipo de servicio que puede brindar, entre otros.

La caracterización de estas instalaciones implica la mejor descripción posible de su infraestructura físico-funcional, lo cual incluye; elementos estructurales, no estructurales y equipamiento, que permitirá luego de un estudio de vulnerabilidad sísmica específico, estimar la predisposición de ser afectado por la ocurrencia de un sismo con determinadas características.

La capacidad y el tipo de servicio que puede brindar, generalmente se expresa en términos del número de camas disponibles para la atención de la emergencia sísmica. Esta capacidad efectiva se relacionada con el número nominal de camas existentes, el coeficiente medio de ocupación y el número de camas perdidas como consecuencia de la acción sísmica, que depende de la vulnerabilidad sísmica del centro hospitalario, ya que el daño en cada hospital puede ser expresado en función del número de camas perdidas, que es proporcional al costo directo de los daños provocados por el sismo (OPS, 1993).

En este sentido, para cada centro hospitalario se requiere conocer;

- Datos de identificación del centro hospitalario; nombre, código, etc.
- Localización y clasificación del centro hospitalario.
- Tipo de servicio que ofrece.
- Capacidad instalada. Número de camas totales
- Índice medio de ocupación.
- Centros de referencias para traslados de pacientes y tiempo medios de traslados
- Caracterización de la vulnerabilidad sísmica del centro.

Los cinco primeros parámetros generalmente son proporcionados por las oficinas locales de planificación sanitaria y/o departamentos de sanidad. Describen la red hospitalaria, caracterizando su capacidad instalada y su distribución territorial. Esta distribución generalmente sigue los patrones de distribución de la población, encontrando una mayor densidad de centros hospitalarios hacia las áreas urbanas donde existe una gran concentración de población, mientras que en las zonas rurales o poco pobladas, la densidad de centros hospitalarios tiende a ser baja y generalmente ubicada a grandes distancias.

La información de los centros de referencia para traslados de pacientes y los tiempos medios de traslados, permiten contemplar la posibilidad que un centro hospitalario traslade a un paciente a otro centro de referencia, bien porque está imposibilitado físicamente de atender esa emergencia por insuficiencia de camas disponibles o bien, porque los requerimientos de cuidados escapan de sus posibilidades instaladas. En situaciones de emergencia, la logística que siguen los hospitales para atención de pacientes es realmente compleja, y la decisión de un traslado dependerá entre otros factores, de la proximidad del centro de referencia, de su capacidad de atender este traslado, de las características de cuidado requerido e inclusive, de la posibilidad de mantener comunicación entre los centros. Una vez definido el traslado, el tiempo dependerá nuevamente de la viabilidad disponible entre los centros hospitalarios y la velocidad de transporte.

Desde el punto de vista logístico, los centros hospitalarios están, clasificados según su capacidad y el tipo de servicio que ofrecen, agrupados para cubrir sectores o regiones sanitarias, de manera que en condiciones ordinarias, existe toda una planificación que soporta la toma de decisiones de estos traslados; sin embargo, en condiciones de emergencia como las debidas a un sismo, estos patrones pueden verse fuertemente modificados por otras variables, como la disponibilidad del centro de referencia, las posibilidades de establecer comunicación, etc.

En este sentido, juega un papel preponderante para la atención de una emergencia sísmica, la posibilidad de establecer comunicación entre los centros hospitalarios y un permanente intercambio de información, que permita por ejemplo, para un centro hospitalario saturado, conocer la situación de sus centros de referencia, antes de proceder a los traslados. Esto pone en evidencia la importancia que los sistemas de comunicación, como parte de las líneas vitales, se mantengan operativos durante la gestión de la emergencia sísmica.

Finalmente, la caracterización de la vulnerabilidad sísmica de cada hospital debe, al menos preliminarmente, permitir de manera sencilla establecer una correlación directa entre el daño, expresada como camas perdidas y la peligrosidad del sitio de su emplazamiento.

8.2.3.3. Descripción de la vialidad y otras líneas vitales

La clara interrelación existente entre el sistema sanitario y los sistemas de transporte y otras líneas vitales, exige que estos sean descritos en términos de práctica interpretación.

Los *tiempos de transporte* de los heridos desde su municipio hasta el centro de atención o los *tiempos de traslados* entre centros hospitalarios, está fundamentalmente condicionado por la vialidad existente. Estos tiempos dependen de las características de la vía, las velocidades medias de transporte y de la propia vulnerabilidad de la vía, así como de cualquier elemento que la conforme (puentes, túneles, etc).

Dentro de las líneas vitales, destacan en su interrelación con el sistema sanitario aquellos relacionados con los *sistemas de comunicación*, pues determinan la posibilidad de mantener operativa, en condiciones de emergencia, una coordinación efectiva de las funciones de atención sanitaria de los centros involucrados. Otros sistemas como los de *suministro de agua o energía*, pueden ser determinantes, dependiendo de la existencia de fuentes autónomas de abastecimiento y por supuesto, de su propia vulnerabilidad, ya que pueden afectar indirectamente la capacidad de los centros hospitalarios de continuar prestando sus servicios.

8.2.4. Respuesta sísmica del Sistema Sanitario Regional

La respuesta del sistema sanitario regional dependerá del *escenario sísmico* considerado. Este escenario debe ser compatible con la sismicidad característica y los patrones de atenuación de la región.

La sismicidad generalmente se describe a través de las *fuentes sismogénicas*, en términos de parámetros evaluados sobre la base de la sismicidad histórica de la región, mientras que los *patrones de atenuación*, se describen a través de modelos ajustados tomando en cuenta el decremento observado con la distancia de los parámetros del movimiento sísmico (intensidad, aceleración, etc.).

A cada escenario sísmico está asociado un *escenario de daños*, que describe las consecuencias directas e indirectas del evento. La evaluación de la respuesta sísmica del sistema sanitario regional implica:

- a. Estimar el incremento de la demanda del sistema, representado por el número de personas afectadas por los daños físicos en edificios u otras instalaciones, que demandarán unidades de cuidado del sistema sanitario.
- b. Determinación de la capacidad efectiva del sistema, representada por el número de camas efectivamente disponibles, luego de reducir el número de camas disponibles en condiciones ordinarias por el número de camas perdidas.
- c. Estimar la evolución temporal de la atención de la emergencia, representada por el flujo de las personas afectadas o heridos, desde su lugar de origen hasta el centro de atención de salud que le suministre atención.

En condiciones ordinarias, los centros de atención de salud y en particular los hospitales, presentan un nivel de ocupación medio tal que el número de unidades de cuidado o camas disponibles por centro dependerá de la capacidad instalada y del índice de ocupación medio.

Al ocurrir un evento sísmico, cada uno de estos centros puede verse afectado funcional, estructural o no estructuralmente, con una reducción de su capacidad de prestar servicio a la comunidad, lo cual puede traducirse en una pérdida equivalente de camas. Paralelamente, como consecuencia de los daños físicos en edificios u otras instalaciones, la población será afectada y un número de personas requerirán atención médica especializada. La mayor parte serán heridos leves, cuya atención podrá realizarse localmente en centros ambulatorios y de asistencia primaria, sin embargo, los heridos graves, requerirá atención inmediata y especializada, representando así un incremento súbito de la demanda de asistencia sanitaria. Esta situación representa una condición extrema del sistema, de carácter dinámico; es decir, que evoluciona en el tiempo y para cuya evaluación se requiere de un estudio de la respuesta sísmica del sistema sanitario regional, lo cual comprende:

1. Caracterización de la amenaza o peligrosidad regional.
2. Clasificación de las edificaciones y otras instalaciones expuestas.
3. Un modelo para estimar las pérdidas, su distribución espacial y los efectos en la población y el sistema sanitario.
4. Un modelo para simular la evolución temporal de la atención de la emergencia.
5. Definición de índices de desempeño que caractericen la respuesta del sistema y sus elementos integrantes.

8.2.5. Caracterización de la respuesta sísmica del Sistema Sanitario Regional

En caso de un evento sísmico, la tasa de mortalidad de personas afectadas se reduce sustancialmente si estos heridos reciben los apropiados cuidados en el menor tiempo posible (Nutti y Vanzi, 1999). Este tiempo de atención depende, de la distancia recorrida por el afectado hasta el centro de atención, de la velocidad media de transporte y de la capacidad del centro de prestarle atención médica oportuna. Desafortunadamente, después de un sismo importante, estos parámetros pueden verse fuertemente afectados, incrementándose el riesgo de cada herido y disminuyendo la eficiencia del sistema sanitario en la atención de la emergencia, debido a los daños y/o congestión de los hospitales, así como a los daños y/o congestión de las vías de comunicación y otras líneas vitales.

Esta situación pone de manifiesto la interrelación que existe entre el sistema sanitario y los sistemas de vialidad y de líneas vitales en una región. De manera que, la apropiada caracterización de la respuesta sísmica de un sistema sanitario regional quedará sujeta a la incorporación de estos factores adicionales.

Caracterizar la respuesta sísmica de un sistema sanitario regional no es una tarea trivial. Dicha caracterización debe estar orientada a definir parámetros suficientemente generales, que permitan sintetizar el desempeño global del sistema y a la vez, suficientemente específicos, que permitan describir el desempeño de cada uno de los centros de atención de salud, con miras a jerarquizar su importancia relativa dentro del sistema en la atención de una emergencia sísmica.

Estudios anteriores (Nutí y Vanzi, 1999) han empleado índices de desempeño orientados a calificar, la calidad del servicio para los usuarios del hospital y los costos de reparación para sus propietarios. Para describir la calidad del servicio emplean como índices, la distancia cubierta por afectado y el coeficiente de ocupación del centro, mientras que para cuantificar los costos de reparación, emplean como índice, el número de camas perdidas.

La distancia cubierta por afectado es un índice apropiado para describir el desempeño del sistema y la capacidad de respuesta de la red hospitalaria para atender la demanda de la población afectada distribuida en la región, siempre que exista una distribución uniforme de vialidad, ya que en estos casos, la distancia es proporcional al tiempo de atención. Sin embargo, existen regiones donde las redes viales no son uniformes, razón por la cual, los tiempos de atención dependerán además de las distancias recorridas, de los tipos de vialidad disponibles. En este sentido, parece más conveniente emplear directamente, el tiempo de atención de la emergencia como índice para describir el desempeño del sistema, aunque esté condicionado a la respuesta de otros sistemas, especialmente al sistema de transporte.

El número de camas perdidas por centro es un índice apropiado para cuantificar el riesgo sísmico de cada hospital, ya que depende del nivel de peligrosidad al cual está expuesto el centro y su propia vulnerabilidad sísmica. Está relacionado con el daño de cada hospital, bajo el supuesto que el número de camas perdidas es proporcional al costo directo de los daños causados por el sismo. Aunque es un índice independiente del comportamiento del sistema afecta el desempeño del mismo.

En este sentido, será necesario emplear diferentes índices de desempeño para medir o caracterizar la respuesta sísmica de un sistema sanitario regional. Algunos, orientados a describir el daño directo de cada hospital, como el número de camas perdidas y otros orientados a describir la degradación de la calidad del servicio ofrecido por el sistema, como el tiempo de atención de la emergencia o la distancia cubierta por afectado. Estos parámetros o cualquier combinación de ellos, deben ser capaces de definir una plataforma de decisiones que permitan jerarquizar la importancia relativa de cada centro hospitalario en la atención de la emergencia sísmica.

8.3. IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO PARA LA EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA DEL SISTEMA SANITARIO REGIONAL

8.3.1. Definición del escenario sísmico

La definición del escenario sísmico comprende la determinación para cada municipio de los valores de intensidad macrosísmica esperados como consecuencia de la ocurrencia de un evento sísmico específico. Ello requiere de la definición de un *modelo de peligrosidad regional* que describa de manera representativa la sismicidad de la región.

El modelo de peligrosidad regional debe considerar todas aquellas fuentes sismogénicas que tienen influencia sobre la región; es decir, cualquier fuente que pueda dar origen a un sismo capaz de inducir algún tipo de daño en las edificaciones de la región.

Este proceso de caracterización de las zonas fuente implica;

- Localización de las zonas fuentes
- Zonificación sismotectónica (fallas discretas o zonas extensa)
- Cuantificación del potencial sísmico
- Modelo para sucesión de sismos en el tiempo.
- Definición de los patrones de atenuación regional.

La localización de las zonas fuentes debe adecuarse al contexto tectónico y prestar especial atención a los indicadores geológicos, geomorfológicos, geodésicos y sismológicos de la región, a los fines de identificar las fuentes activas, que forman parte del proceso tectónico actual y capaces de producir terremotos en un futuro.

La zonificación sismotectónica consiste en la geometrización de las zonas fuentes. En este punto, es importante localizar y caracterizar el tipo de falla, siendo posible su identificación como fallas individuales, con expresión probable en superficie, en zonas de elevada sismicidad, asociada a grandes deformaciones tectónicas (generalmente zonas interplacas). En zonas con deformaciones tectónicas moderadas a débiles (generalmente zonas intraplacas), con sismicidad escasa y difusa, es conveniente hacer uso de las nociones estructurales y tectónicas para determinar límites de zonas donde el comportamiento sísmico pueda ser homogéneo, definiendo así fuentes sísmicas extensas.

La cuantificación del potencial sísmico de una zona fuente implica la definición de un sismo característico y una ley de recurrencia, que exprese la frecuencia de sismos en función de la intensidad epicentral o magnitud (como medida de la talla del sismo). El sismo característico generalmente se define en base al sismo máximo, determinado por métodos basados en dimensiones de ruptura para fallas bien conocidas, segmentos de ésta, o por métodos basados en sismicidad histórica, sobre la base que el sismo máximo histórico, representa una cota inferior del sismo máximo. Para la ley de recurrencia, se emplea casi universalmente una relación ajustada de las observaciones basadas en la sismicidad histórica, propuesta por Gutenberg y Richter (1954) tanto para fallas individuales como para zonas extensas, según el modelo clásico de Cornell, con sismicidad difusa.

En el presente trabajo, la distribución de intensidades para cada zona fuente se modela a través de una doblemente truncada ley de Gutenberg-Richter (Secanell, 1999), según la cual;

$$\lambda(i) = \alpha F(i)$$

$$F(i) = \frac{e^{-\beta(i-i_{\min})} - e^{-\beta(i_{\max}-i_{\min})}}{1 - e^{-\beta(i_{\max}-i_{\min})}} \quad (8.1)$$

- α frecuencia media anual de sismos con intensidad igual o superior a i_{\min}
- $F(i)$ probabilidad de obtener una intensidad igual o superior a la intensidad i
- $\lambda(i)$ frecuencia media anual de sismos con intensidad igual o superior a i
- i_{\min} intensidad mínima por debajo de la cual no se espera que ocurra daño
- i_{\max} intensidad máxima por encima de la cual no se espera ningún evento
- β parámetro de distribución de eventos con intensidad sísmica igual o superior que i_{\min}

La distribución o sucesión de sismos en el tiempo, sigue un modelo estacionario de Poisson, sin memoria, según el cual,

$$P(n, t) = \frac{e^{-\lambda t} (\lambda t)^n}{n!} \quad (8.2)$$

de manera que la probabilidad de exceder un sismo de intensidad i en un tiempo t , viene dada como:

$$P[I \geq i, t] = 1 - e^{-\lambda_i t} \quad (8.3)$$

La determinación de los parámetros de la ley de Gutenberg-Richter característicos de cada zona sismogénica (α , β , i_{\min} , i_{\max}), se realiza sobre la base de la sismicidad histórica de la región. Los valores adoptados para estos parámetros en la aplicación realizada sobre la región de Cataluña se resumen más adelante en la Tabla 9.6.

Finalmente, el patrón de atenuación debe ser capaz de reproducir a nivel regional, la disminución de la intensidad en función de la distancia epicentral. La mayoría de las leyes de atenuación se determinan de manera empírica, mediante el ajuste de modelos de atenuación más o menos elaborados, de datos disponibles de intensidades puntuales percibidas en sismos pasados. Estos modelos generalmente se desarrollan sobre la base de la teoría de propagación de ondas y parten de la suposición que un terremoto de foco puntual se propaga en un medio isótropo y homogéneo, lo que implica que la disminución de la energía es función únicamente de la distancia en proporción a la extensión geométrica (aumento de superficie del frente de onda) y la atenuación inelástica (absorción de energía por roce del material).

Existen numerosos modelos de atenuación propuestos en la literatura. El modelo de atenuación adoptado en el presente trabajo es el modelo de Sponheurer (Secanell, 1998), según el cual,

$$I_0 - I = k \log \left(\frac{\sqrt{x^2 + h^2}}{h} \right)^b + 0.434 k \gamma (\sqrt{x^2 + h^2} - h) \quad (8.4)$$

donde,

I_0	Intensidad epicentral
I	Intensidad percibida a un distancia x
h	Profundidad focal
b	Coefficiente de expansión geométrica
γ	Coefficiente de atenuación inelástica
k	Factor de ajuste
\log	logaritmo decimal

Los valores adoptados para estos parámetros en la aplicación realizada sobre la región de Cataluña se resumen más adelante en la Tabla 9.6.

8.3.2. Definición de los escenarios de daño

Dependiendo del área específica de estudio, a cada escenario sísmico está asociado un escenario de daños. Así por ejemplo, para estudiar la respuesta sísmica de un sistema sanitario regional, es imprescindible conocer, por una parte la distribución geográfica de personas heridas que representarán la demanda y por la otra parte, la capacidad efectiva del sistema para atender dicha situación de emergencia. Para ello es necesario conocer la fragilidad de las edificaciones y de los hospitales y establecer un modelo para definir el estado inicial del sistema inmediatamente ocurrido un evento sísmico; esto es, la definición de heridos por municipios y la determinación de la capacidad efectiva de cada centro.

8.3.2.1. Fragilidad de las edificaciones

La fragilidad de las edificaciones y la densidad media de ocupación, están directamente relacionadas con su capacidad de atención al número de personas afectadas debido a un sismo, que representan la demanda inicial del sistema. La distribución espacial de heridos y afectados, condiciona la respuesta del sistema.

Cada edificación puede estar asociada a una tipología estructural correspondiente a una clase de vulnerabilidad, de manera que, la fragilidad de las edificaciones puede ser descrita a través de las matrices de probabilidad de daño – MPD características de dicha clase de vulnerabilidad. Estas relaciones daño-movimiento, establecen la distribución de la probabilidad de daño correspondiente a diferentes estados o grados de daño, para cada nivel del movimiento del terreno. Generalmente se establecen para diferentes tipologías de edificios, agrupados en clases de vulnerabilidad y su definición depende del parámetro empleado para caracterizar la amenaza.

En el presente estudio, la amenaza ha sido caracterizada a través de la intensidad macrosísmica. La definición de la intensidad macrosísmica (I), la clase de vulnerabilidad (T) y la clasificación de los grados de daño (GD), utilizan como base la Escala Macrosísmica Europea EMS-98 (Grünthal, 1993). Sobre esta definición y utilizando como base los resultados de la vulnerabilidad observada³ luego de varios terremotos de Italia, propuesta por Braga et al. (1982) y adaptadas por Chávez (1998), se definen las matrices de probabilidad de daño MPD, que determinan la probabilidad que se dé un grado de daño d, en un edificio de clase de vulnerabilidad o tipología T, cuando se produce una intensidad I.

$$P[\text{GD} = d | T, I] \quad (8.5)$$

8.3.2.2. Fragilidad de los hospitales

La fragilidad de los hospitales es un problema mucho más delicado. Es importante reconocer que los hospitales son de hecho, sistemas complejos que contienen una gran cantidad de elementos sísmicamente vulnerables, frecuentemente más frágiles que la estructura que los contiene y de los cuales depende su funcionalidad.

³ La *vulnerabilidad observada* se refiere a la valoración realizada sobre la estadística de daños de sismos pasados, en contraposición con *la vulnerabilidad procesada*, que se refiere a la valoración del desempeño de las edificaciones, basadas en cálculos específicos o juicios de expertos (Coburn y Spence, 1992).

El número de camas perdidas en cada centro de atención de salud, está directamente relacionado con la fragilidad de los hospitales y su capacidad instalada. La localización de centros sanitarios y su capacidad disponibles, condiciona la respuesta del sistema. De manera que la apropiada caracterización de la fragilidad de los hospitales exige un estudio específico para cada centro, que permita obtener la distribución del daño para los diferentes estados considerados.

Existen diferentes metodologías de evaluación de la fragilidad de hospitales, entre las que destacan los trabajos de Monti y Nuti (1996), donde se modela cada hospital como un sistema, y se evalúa la distribución de la probabilidad de falla asociada a un estado límite de pérdida de funcionalidad del teatro de operaciones.

En el presente estudio y de manera preliminar, se han empleado las mismas MPD utilizadas para describir la fragilidad de las edificaciones, asociada a un grado de daño GD2 según EMS-98, correspondiente a un nivel de daño moderado (con daño estructural ligero y con un daño no estructural moderado, que requiere reparaciones menores) por considerarse que este estado de daño compromete la funcionalidad de la instalación.

El valor medio de la fragilidad de cada hospital se representa a través de un indicador o índice de daño – ID, que varía entre 0 (sin daño) y 1 (colapso total). Este índice expresa la relación entre el número de camas perdidas y el número de camas existentes. De manera que, el número de camas perdidas será el producto del indicador de daño por la capacidad instalada del hospital.

El criterio empleado para relacionar el indicador de daño con la probabilidad de falla sigue la propuesta de Nuti y Vanzi (1999), según la cual, se supone que no hay daño (indicador de daño, $ID = 0$) para una probabilidad de falla $P_f < 0.2$ y que existe un colapso funcional⁴ (indicador de daño, $ID = 1$) para una probabilidad de falla $P_f > 0.6$. A cada una de estas condiciones está asociada una I_{min} , por debajo de la cual no hay daño y una I_{max} , por encima de la cual se espera un colapso funcional. Para valores intermedios de I se supone una variación lineal del índice de daño, tal como se indica en la Fig. 8.2.

De manera que para determinar los valores de intensidad I_{min} e I_{max} representativos de la fragilidad de cada hospital es necesario definir la curva de fragilidad asociada al grado de daño GD2 y estimar los valores de intensidad correspondientes a las probabilidades de 0.2 y 0.6, respectivamente.

⁴ El *colapso funcional* no implica necesariamente un colapso estructural. Se refiere a aquella condición de perturbación y/o daño, que impide al centro hospitalario mantener sus funciones como consecuencia del sismo.

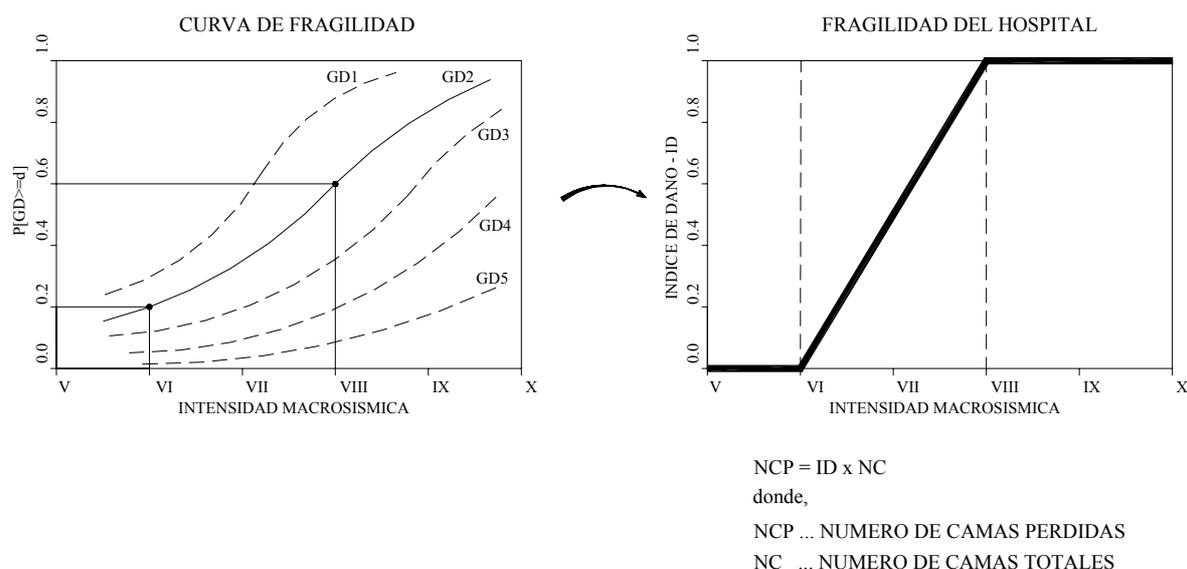


Fig. 8.2. Definición fragilidad de los hospitales

8.3.2.3. Estimación de víctimas

La estimación de las víctimas humanas debido a un sismo es un problema bastante complejo (Durkin, 1987). La definición del número de personas heridas, determinará la demanda inicial del sistema sanitario.

Diferentes modelos han sido propuestos para la estimación de víctimas humanas debido a un sismo, entre las que destacan las metodologías de Coburn y Spence (1992) y del ATC-13 (1985). El primero, establece el uso de una expresión analítica, ajustada a partir del análisis de más de 1.000 terremotos importantes. Esta relación es específica para edificios colapsados y considera como parámetros, la población por edificio, la ocupación según el horario, entre otros. La metodología propuesta por el ATC, establece unos porcentajes de personas afectadas (heridos leves, heridos graves, muertos) en función de los diferentes niveles de daño (estructurales y no estructurales) experimentado por las edificaciones, deducidos por un grupo de expertos a partir de terremotos ocurridos en E.E.U.U.

Otras alternativas (Nutti y Vanzi, 1999) contemplan la posibilidad de ajustar de manera directa para cada municipio una correlación o ley intensidad-heridos, que permita determinar para cada valor de la intensidad macrosísmica el porcentaje de la población afectada.

La Tabla 8.1., resume los valores de proporción de víctimas propuestos por el ATC-13 (1985), que han servido de base en el presente trabajo para estimar el número de personas afectadas debido a un sismo.

Tabla 8.1. Proporción de víctimas para cada grado de daño s/ATC-13 (1985)

Grado de Daño	Heridos Leves	Heridos Graves	Muertos
GD1	3.3/10000	1.1/25000	1.1/100000
GD2	3/1000	1/2500	1/10000
GD3	3/100	1/250	1/1000
GD4	3/10	1/25	1/100
GD5	2/5	2/5	1/5

8.3.3. Modelo de respuesta del sistema

La evaluación de la respuesta sísmica de un sistema sanitario regional requiere que el modelo sea capaz de reproducir de manera *dinámica* el flujo de personas afectadas desde el instante inmediatamente posterior a la ocurrencia de un evento sísmico ($t=0$) hasta el momento en que todos los heridos reciban la atención médica requerida. La respuesta estará condicionada por la distribución espacial de heridos y hospitales, la capacidad de los centros, la disponibilidad de la vialidad para el transporte de heridos, la posibilidad de coordinar la actividad de estos centros y establecer comunicación entre ellos, en fin, tantas condicionantes que ponen de manifiesto el carácter no trivial de la respuesta del sistema.

8.3.3.1. Estado inicial ($t=0$)

En el instante inmediatamente posterior a la ocurrencia de un evento sísmico ($t=0$) que produzca algún nivel de daño en la población, es posible estimar la distribución de heridos por municipios y la capacidad efectiva de cada hospital, lo cual requiere conocer el correspondiente escenario sísmico.

Conocer el escenario sísmico implica estimar para cada unidad geográfica básica de información, en este caso los Municipios, la intensidad macrosísmica esperada (I_m). Este escenario puede representar directamente la reproducción del escenario de un sismo histórico de interés, a través de la adaptación de los mapas de isosistas existentes, o bien, un escenario simulado, suponiendo la ocurrencia de un evento sísmico en un punto determinado, compatible con la fuente sismogénica que le contiene y distribuyendo las intensidades según el modelo de atenuación para la región.

Para cada municipio, es posible estimar en función de su población y las características de las edificaciones existentes, los daños directos (daños en las edificaciones) y las pérdidas asociadas (en infraestructura y víctimas humanas). En particular, para aquellos municipios donde existe un hospital, es posible estimar, en función de la capacidad instalada y vulnerabilidad sísmica, la capacidad efectiva para atención de la emergencia. También es posible evaluar el impacto del sismo sobre los sistemas de transporte y líneas vitales, entre otros.

8.3.3.2. Evolución temporal ($t>0$)

La simulación dinámica del proceso implica el reconocimiento de la evolución temporal de la atención de la emergencia. De manera natural, los heridos de cada municipio son transportados al hospital más cercano o de adscripción, sin intercambio de información; esto supone que en principio los heridos de cada municipio desconocen el estado y la disponibilidad del centro para prestarle atención médica. El tiempo empleado por cada herido desde su punto de origen hasta el centro de atención, dependerá de la distancia

efectiva, del tipo de vialidad y de la disponibilidad de la misma. Estos dos últimos factores condicionan la velocidad de transporte.

Los hospitales ubicados en el área epicentral y sus alrededores o en aquellas zonas afectadas, empezarán a recibir sucesivamente un volumen de heridos que requieren atención médica. La capacidad de estos hospitales de ofrecerles este servicio dependerá de su capacidad disponible y del nivel de degradación impuesto por el sismo. Inclusive, puede darse el caso que el hospital se degrade a un punto tal que ni siquiera sea capaz de atender a sus propios pacientes, en este caso, estos heridos se convierten en una carga adicional para el sistema.

Cada hospital estará en condiciones de prestar servicios hasta que se sature su capacidad. A partir de este momento, cualquier excedente en la demanda, debe ser trasladado a alguno de los hospitales de referencia, con intercambio de información. Esto supone que los sistemas de comunicación permanecen funcionales, de manera que la decisión del traslado dependerá de la disponibilidad del centro de referencia para recibir estos traslados, de la cercanía del centro, del nivel de servicio requerido. Nuevamente, el tiempo empleado por cada herido desde un hospital hasta el centro de referencia dependerá de la distancia efectiva, del tipo de vialidad y de la disponibilidad de la misma. Estos dos últimos factores condicionan la velocidad de transporte. Mientras que la funcionalidad de los sistemas de comunicación condicionará la eficiencia de la selección del centro de referencia. El proceso evoluciona hasta que la totalidad de afectados reciban la atención médica requerida, en un tiempo máximo, T_{max} .

La Fig. 8.3., esquematiza la evolución del proceso de atención de heridos. En el mismo se aprecia cómo los heridos del municipio M1 son directamente trasladados a su centro natural de referencia, el hospital H1, el cual como consecuencia del evento sísmico, ha sufrido daños al punto que es incapaz de mantener sus operaciones y debe trasladar sus pacientes y los heridos que han llegado al hospital H2, que a su vez está recibiendo heridos provenientes del municipio M2. Una vez saturada su capacidad, este hospital debe trasladar el excedente de pacientes al próximo hospital disponible, en este caso, el hospital H4, ubicado en la periferia del área epicentral. Por su parte, el hospital H3, que no se ha visto degradado en su capacidad de prestar servicios, recibe la afluencia de los heridos de los municipios M3a y M3b del área epicentral, hasta que su saturación exija el traslado de pacientes excedentes al hospital de referencia H4 del área periférica.

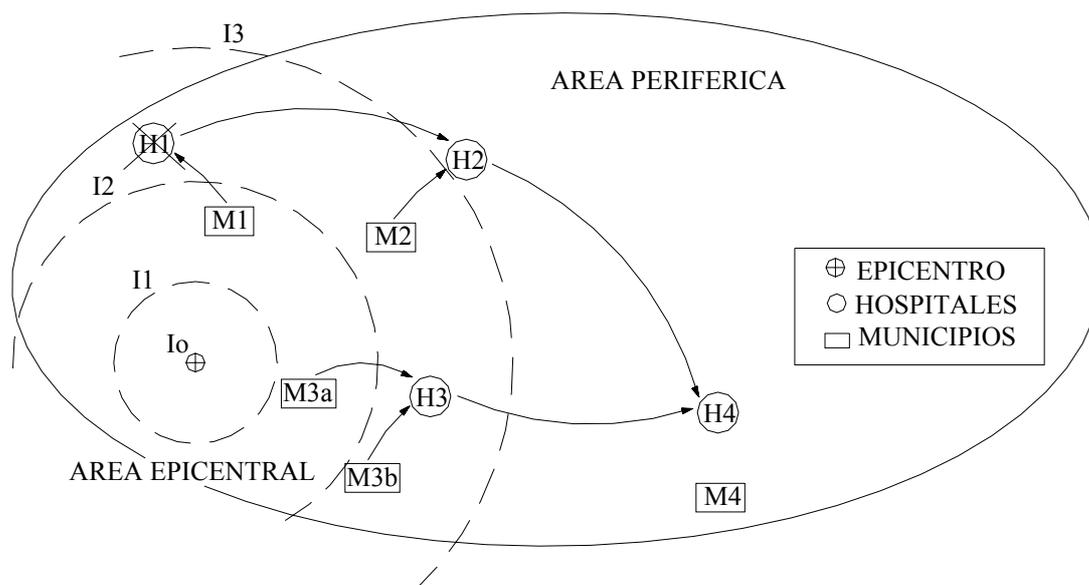


Fig. 8.3. Esquematación de la evolución del proceso de atención de heridos

8.4. CUANTIFICACIÓN DEL DESEMPEÑO SÍSMICO DEL SISTEMA SANITARIO

Ante la ausencia de índices específicos que permitan cuantificar el desempeño sísmico del sistema sanitario y de cada uno de sus elementos integrantes, en el marco del presente trabajo se proponen los siguientes factores:

8.4.1. Factor de respuesta del sistema

La definición de un factor que permita calificar la respuesta sísmica de un sistema sanitario no es una tarea fácil, ya que el mismo debe ser suficientemente representativo para valorar la capacidad de respuesta del sistema en la atención de la crisis sísmica y servir de base para discernir sobre cuales son los escenarios más críticos para el sistema instalado. Además, debe ser capaz de identificar la influencia que tiene sobre la respuesta global del sistema la implementación de diferentes acciones, tales como; intervención de instalaciones existentes para reducir su vulnerabilidad, incremento de su capacidad para cubrir excesos de demanda en condiciones de emergencia, instalación de campamentos sanitarios en el área epicentral, etc. Debe ser obtenido del estudio de diferentes escenarios sísmicos y definido sobre la base de un concepto general, como el de riesgo sísmico.

Para justificar el factor propuesto conviene apoyarse en el siguiente razonamiento. De acuerdo con las definiciones propuestas por el UNDRO (1979), el término riesgo sísmico se refiere a las pérdidas esperadas en un elemento expuesto para un período de tiempo especificado. Este elemento puede ser un edificio, grupo de edificios, una población, una actividad económica; en este caso, el elemento expuesto es el sistema sanitario regional. De manera que el riesgo sísmico estará en proporción a la capacidad instalada de un sistema sanitario que requiere ser movilizadada para cubrir el incremento de la demanda que surge como consecuencia de un evento sísmico. Para cada escenario sísmico, la demanda está directamente relacionada con el número de heridos (medida de la

amenaza), mientras que su capacidad para la atención de la emergencia, dependerá del condicionamiento del sistema (medida de su vulnerabilidad).

Usando como base este razonamiento, se justifica que para cada escenario sísmico, el *factor de respuesta del sistema – FR*, se defina en proporción al número de heridos y la evolución de la atención de la emergencia en el tiempo, cuantificada como el área encerrada por la curva de atención (Fig. 8.4.), definida como el número de heridos que requieren atención médica en cada instante de tiempo y afectada por un factor de riesgo del paciente, que toma en cuenta el incremento del riesgo del paciente después de superado un tiempo crítico *Tcrit*.

$$FR = \int_{t=0}^{t=T_{max}} NH(t)R(t) dt \quad (8.6)$$

NH(t) Evolución temporal del número total de heridos
 Tmax Tiempo máximo de atención de la totalidad de heridos (min)
 R(t) Relación de riesgo-paciente, según,

$$R(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } t \leq T_{crit} \\ 1 + \alpha(t - T_{crit})^n & \text{si } t > T_{crit} \end{cases} \quad (8.7)$$

Tcrit Tiempo crítico a partir del cual se incrementa el riesgos de los pacientes en tránsito por falta de atención médica (min)
 α, n Factores de ajuste numérico⁵

El *factor de respuesta normalizado*, se define como el factor de respuesta del sistema, normalizada por el número total de heridos iniciales NHI (t=0)

$$FRN = \frac{FR}{NHI} \quad (8.8)$$

La Fig. 8.4., ilustra gráficamente el significado del factor de respuesta del sistema. Partiendo de la curva que describe la evolución de la atención de heridos en el tiempo NH(t) y afectada por una relación riesgo-paciente R(t), se obtiene una curva de atención de heridos corregida cuya área representa el factor de respuesta del sistema sanitario.

El factor de respuesta del sistema es un índice que aumenta con el incremento del número de heridos iniciales NHI, con el incremento del tiempo máximo de respuesta Tmax y que está directamente relacionado con la manera como evoluciona la atención de los pacientes en el tiempo. Si la atención de pacientes evoluciona rápidamente el factor de respuesta del sistema tiende a disminuir, mientras que si la atención de pacientes evoluciona lentamente el factor de respuesta del sistema tiende a aumentar. El factor de respuesta del sistema también aumenta si se supera un tiempo crítico Tcrit, a partir del cual se estima que incrementen los riesgos de los pacientes en tránsito por falta de atención médica.

⁵ Factores numéricos ajustados en función de las recomendaciones médicas para el tipo de patología comúnmente esperada como consecuencia de un sismo. Los valores adoptados para estos parámetros en la aplicación realizada sobre la región de Cataluña son Tcri = 60 minutos, α = 0.0003 , n = 2

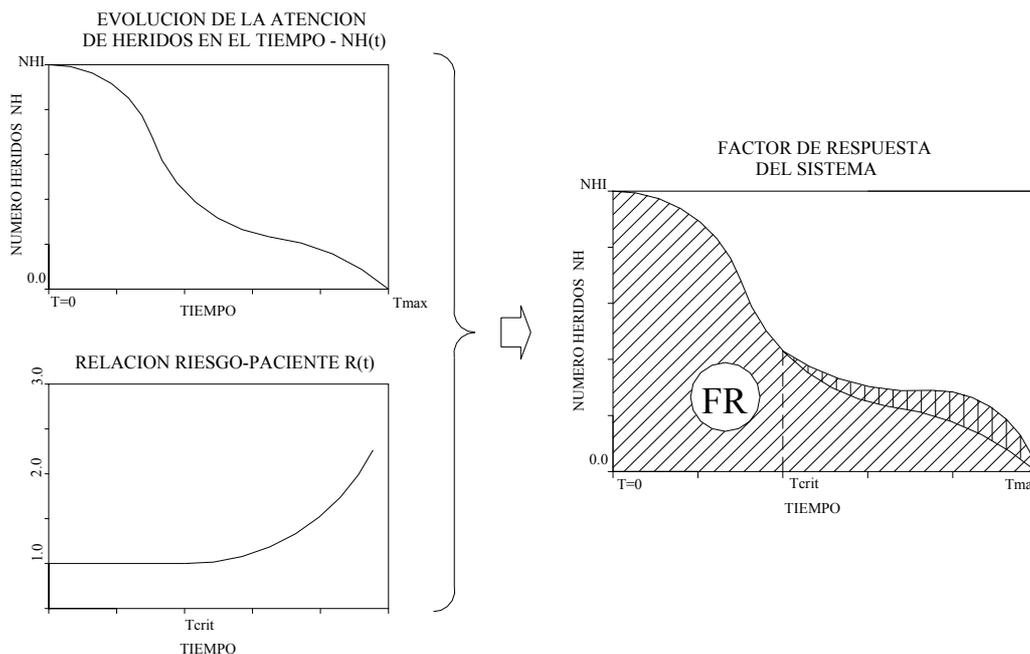


Fig. 8.4. Factor de desempeño del sistema.

Se trata por lo tanto de un factor no acotado que cuantifica el desempeño sísmico del sistema sanitario regional ante un escenario de daño impuesto por un escenario sísmico determinado y que permite calificar de manera relativa la capacidad de respuesta del sistema al comparar diferentes escenarios. De manera que un aumento en el factor de respuesta del sistema indica una gestión menos eficiente en la atención sanitaria de la emergencia sísmica y por el contrario, una reducción del factor de respuesta del sistema corresponde a una gestión más eficiente en la atención sanitaria de la emergencia sísmica. En otras palabras, si se comparan dos escenarios sísmicos determinados, la respuesta del sistema sanitario será más eficiente en aquel que reporte un valor menor del factor de respuesta del sistema.

Sin embargo, la definición del factor de respuesta del sistema depende del número de total de heridos iniciales NHI ($t=0$), con lo cual la respuesta del sistema queda vinculada a la demanda inicial que varía al cambiar el escenario sísmico considerado. De manera que este factor es apropiado para caracterizar la respuesta sísmica del sistema sanitario ante diferentes escenarios sísmicos, pero no es apropiado para caracterizar el condicionamiento que tiene un sistema sanitario regional para atender las consecuencias asociadas a un escenario sísmico determinado.

En este sentido, se propone emplear el factor de respuesta normalizado que describe de manera más apropiada la posibilidad que tiene un sistema sanitario regional de atender las consecuencias de un evento sísmico; es decir, este factor cuantifica el condicionamiento que tiene el sistema sanitario para atender un escenario de daño. A mayor factor de respuesta normalizado peor condicionamiento del sistema. Así por ejemplo, si dos escenarios conducen al mismo factor de respuesta del sistema, el sistema sanitario estará mejor condicionado para enfrentar el escenario sísmico caracterizado por un número mayor de heridos iniciales, pues su factor de respuesta normalizado será menor.

8.4.2. Factor de respuesta de los hospitales

El factor de respuesta de los hospitales debe ser capaz de valorar tanto la actuación del hospital en la atención de la emergencia, como las pérdidas de cada hospital, expuesto a un determinado nivel de amenaza sísmica. Está directamente relacionado con cada escenario sísmico considerado.

Usualmente se utiliza el número de camas perdidas como una medida de los daños directos que potencialmente puede sufrir cada hospital. Para efectos de comparación de los niveles de riesgo a los cuales está expuesto cada hospital, es importante reconocer la diferencia en la importancia relativa de cada cama como unidad de cuidado. Esta diferencia se fundamenta básicamente en dos aspectos; el primero, el valor de cada unidad de cuidado dependiendo del tipo de hospital, que debe ser representativo del costo de reposición de dicha cama y que por tanto, varía con las características del hospital; el segundo, la importancia relativa de la unidad de cuidado según el contexto regional, que es proporcional a la densidad de habitantes por cama asociada a cada sub-región.

La actuación de cada hospital dependerá de su nivel de participación en la atención de las emergencias asociadas a un determinado nivel de amenaza. Existen hospitales que, por su ubicación, las características del servicio y por las características de la población que les rodea, constituyen instalaciones indispensables en la atención de la emergencia sísmica. Ello dependerá de su capacidad disponible y de la demanda potencial de sus servicios.

Para cuantificar el nivel de actuación de cada hospital, se propone el siguiente *factor de respuesta del hospital – FRH*, definido como:

$$FRH = \left(1 + \frac{NH}{NCD}\right) \left(1 + FI \frac{NCP}{NCT}\right) - 1 \quad (8.9)$$

donde,

- NH* Número total de heridos desplazados al centro hospitalario
- NCD* Número de camas disponibles iniciales (t=0)
- NCP* Número de camas perdidas
- NCT* Número de camas totales del centro hospitalario
- FI* Factor de importancia de la cama, definido como $FI = FI * F2$
- FI* Factor de importancia del centro, según Tabla 8.2.
- F2* Densidad normalizada de habitantes por camas, para cada región sanitaria⁶

Tabla 8.2. Factor de importancia del centro hospitalario

<i>Tipo de Centro</i>	<i>Factor de importancia – FI</i>
Básico	1.0
De referencia	1.3
Especializado	1.5

⁶ El factor F2 es el resultado de dividir el número de habitantes de cada región sanitaria por el número total de camas hospitalarias de dicha región, normalizado respecto la menor relación obtenida. Los valores adoptados para este factor en la aplicación realizada sobre la región de Cataluña se resumen en la Tabla 9.3.

El factor de respuesta de los hospitales toma en consideración, por una parte, la relación demanda-capacidad del servicio y por la otra, el número de camas perdidas, normalizada por el número de camas totales y afectada por un factor de importancia, que toma no sólo en cuenta el valor de reposición de dicha cama en función de la importancia del centro, sino el valor social de la misma, al reconocer que su valor relativo está en función de la población que cubre.

En el caso particular que el centro no sufra degradación de su capacidad de ofrecer servicio $NCP=0$, y que no alcance la condición de saturación $NH < NCD$, se demuestra que el factor de respuesta del hospital, queda acotado entre los valores 0 y 1 y su expresión puede ser escrita como:

$$FRH = \frac{IO_f - IO_i}{1 - IO_i} \quad (8.10)$$

IO_i Índice de ocupación inicial ($t=0$)
 IO_f Índice de ocupación final ($t=T_{max}$)

El factor de respuesta de los hospitales es un índice no acotado que cuantifica el desempeño sísmico de cada hospital en la atención de un escenario sísmico determinado. De acuerdo con la expresión 8.9, el factor $(1+NH/NCD)$ considera la relación demanda-capacidad como una medida de la participación del hospital en la atención de la emergencia, modulada por el factor $(1+FI*NCP/NCT)$ que considera el daño físico directo en término del número de camas perdidas y del valor relativo de dichas camas.

Para interpretar el sentido físico del factor de respuesta de los hospitales es conveniente considerar las siguientes situaciones. Para un hospital cuyas camas están caracterizadas por un factor de importancia $FI = 1$ que no sufre daño físico $NCP = 0$.

- a. $FRH = 0$ corresponde a un hospital que no participe en la atención de la crisis $NH = 0$.
- b. $FRH = 1$ corresponde a un hospital que recibe un número de heridos igual al número de camas disponibles $NH = NCD$.
- c. $FRH = 10$ cuando el número total de heridos desplazados al hospital es 10 veces mayor que el número de camas disponibles, en cuyo caso debe trasladar a otro centro el excedente de pacientes una vez saturada su capacidad.

En caso de que el hospital además de participar en la atención de la emergencia sísmica, experimente degradación de su capacidad de ofrecer servicios ($NCP > 0$), el factor de respuesta del hospital será incrementado en proporción a la relación NCP/NCT . En hospitales básicos cuyas camas se caracterizan por un factor de importancia $FI = 1$, el factor de respuesta puede llegar a duplicarse ante un colapso total del mismo ($NCP = NCT$), mientras que en hospitales especializados en zonas relativamente densas cuyas camas se caracterizan por un factor de importancia alto, el factor de respuesta del hospital puede verse significativamente amplificado hasta con valores por encima de 100.

En este sentido, valores altos del factor de respuesta de los hospitales están asociados a hospitales que tiene una participación deficiente en la atención de la emergencia asociada al escenario sísmico considerado. De manera que para un escenario sísmico determinado, el desempeño sísmico de un hospital será más apropiado en la medida que su factor de respuesta sea menor. El estado ideal corresponde a valores del factor de respuesta de los hospitales por debajo de la unidad, donde se espera que el hospital no sufra

daño físico alguno ($NCP = 0$), manteniéndose plenamente operativo luego del evento sísmico y con un número de camas disponibles suficientes para atender a todos los pacientes que requieran atención médica.

Valores del factor de respuesta de los hospitales por debajo de 10 pueden considerarse aceptables o suficientes, mientras que valores por encima están asociados a un desempeño sísmico insuficiente. Específicamente, para valores del factor de respuesta de los hospitales entre 10 y 100 puede considerarse una respuesta sísmica intermedia, mientras que valores por encima de 100 evidencian una condición crítica en la respuesta del hospital que amerita una revisión detallada del hospital.

8.4.3. Resultados generales

Los resultados obtenidos dependerán de las características del estudio realizado. Hay una variedad de tipos de estudios (Coburn y Spence, 1992) dependiendo de la naturaleza del problema y el propósito estudio. Este trabajo se desarrolla sobre la base de las siguientes evaluaciones:

Estudios de escenarios: Consisten en estimar los efectos de un sismo singular en una región. Usualmente se emplea un sismo extremo o característico, cuya localización se ajusta en base al conocimiento de las zonas fuentes. Se utilizan para estimar personas heridas, edificaciones afectadas, capacidad de manejo de la emergencia, etc.

Estudios de pérdidas potenciales: Orientados a cartografiar los efectos de un nivel de amenaza en una región. Usualmente se definen escenarios sísmicos asociados a un largo período medio de retorno, por ejemplo, 500 o 1000 años, y se estiman los efectos sobre las comunidades o elementos expuestos. Se utilizan para identificar elementos expuestos a mayor riesgo, con miras a priorizar la aplicación de programas de mitigación.

Análisis de riesgo: Orientados a estimar los niveles probables de pérdidas debido a todos los tamaños de sismos ocurridos en un período de tiempo. Usualmente la sismicidad se cuantifica en términos de la probabilidad de sismos de diferentes tallas que pueden ocurrir en ese tiempo y sus efectos se acumulan sobre la comunidad o elemento expuesto al riesgo. Se utilizan para estimar los efectos en un sitio ó sobre un elemento, en un período de tiempo.

Para la definición del escenario sísmico asociado a cada tipo de estudio realizado, el criterio implementado en este modelo parte del supuesto que, para cada área sismogénica, las coordenadas del epicentro son una variable independiente, distribuida uniformemente dentro de cada zona fuente y que la intensidad epicentral I_0 , asociada a un período medio de retorno, depende de las características de la zona sismogénica considerada.

Los resultados de un estudio de escenario, permiten calificar la respuesta del sistema y de cada uno de sus elementos integrantes, para un escenario singular o específico. Así, es posible determinar para cada escenario, el número total de heridos y la evolución de su atención en el tiempo, el total de camas perdidas, el tiempo máximo de atención de los heridos T_{max} , el factor de respuesta del sistema FR y el factor de respuesta normalizado FRN. Asimismo, es posible determinar para cada centro hospitalario, el total de camas perdidas, el total de camas efectivas y disponibles, la evolución de heridos trasladados hasta

el centro, el tiempo de saturación del centro, los heridos trasladados a otros centros, su nivel de actuación, así como el factor de respuesta del hospital FRH.

Los resultados de los estudios de pérdidas potenciales, permiten cartografiar, para diferentes valores establecidos del período medio de retorno y asociado a cada epicentro, el número total de heridos graves, el total de camas perdidas, el tiempo estimado de atención de los heridos, así como el factor de respuesta del sistema FR y el factor de respuesta normalizado FRN.

Finalmente, los resultados de un análisis de riesgo, permiten cuantificar para cada uno de los centros hospitalarios, los niveles probables de pérdida de camas, los niveles probables de demanda del centro y los niveles probables del factor de respuesta del hospital.

8.4.4. Criterios de jerarquización

La jerarquización de los niveles de riesgo sísmico a los cuales se encuentran expuestos los diferentes centros hospitalarios que forman parte de un sistema sanitario regional, debe estar sustentada en criterios que permitan racionalizar la toma de decisiones relativas a la necesidad de implementar programas de intervención y reforzamiento de instalaciones existentes, calificar el desempeño de dichos centros ante una situación de emergencia sísmica y sobre todo, servir de base para la definición de las políticas de reducción de riesgo sísmico de una comunidad a través de apropiados planes de mitigación.

En este sentido, los criterios de jerarquización debe fundamentarse en las conclusiones obtenidas de los diferentes estudios realizados. Los estudios de escenarios, permiten evaluar situaciones de interés asociadas a escenarios históricos o simulados, mientras que los estudios de pérdidas potenciales, permiten comparar los resultados asociados a escenarios sísmicos establecidos sobre la base de un mismo criterio e ilustrar de manera directa, las consecuencias asociadas a determinado sismo y la capacidad de respuesta del sistema, que puede servir de base para la definición de políticas de mitigación del riesgo sísmico. Los resultados de un análisis de riesgo, permiten estimar los niveles probables de pérdidas acumulados, debido a todos los tamaños de sismos en un período de tiempo.

8.5. RESUMEN Y DISCUSION

Reconociendo el hecho que las instalaciones de salud y en particular los hospitales, constituyen instalaciones estratégicas en la primera fase de la atención de la emergencia sísmica, y que el sistema de atención a la salud, referido como sistema sanitario, representa uno de los principales sistemas esenciales, que contribuye de manera determinante a establecer el riesgo sísmico de una comunidad, se implementó un modelo para la evaluación de la respuesta sísmica del sistema sanitario regional fundamentado en el enfoque de vulnerabilidad sistémica, donde se reconoce de manera explícita su nivel de interrelación con otros sistemas, específicamente, los sistemas de comunicación y vialidad.

Para el análisis de la contribución de la vulnerabilidad sísmica del sistema sanitario al riesgo sísmico de una región, es necesario ante todo, contar con una apropiada descripción geográfica del sistema sanitario; esto es, establecer la distribución de población,

de los centros de atención de la salud, de la vialidad y los sistemas de comunicación, sobre la base de la unidad geográfica básica de información. En particular, el modelo implementado se estructura a través de un módulo de información territorial que describe para cada municipio, la información de la población, de los hospitales y establece un modelo de peligrosidad regional, capaz de cuantificar el potencial sísmico conforme a la zonificación sismotectónica y los patrones de atenuación regional.

Sobre la base de este modelo territorial, es posible establecer diferentes escenarios sísmicos a los cuales estará asociado un escenario de daño, conforme a las condiciones de vulnerabilidad de los elementos expuestos. Dicha vulnerabilidad debe ser representativa de las condiciones de fragilidad de las edificaciones y de los hospitales propiamente dichos, y descritas a través de relaciones intensidad-daño que permitan, a través de la definición de modelos apropiados, estimar las víctimas esperadas como consecuencia del evento sísmico, que representarán la demanda inicial del sistema sanitario.

El modelo de respuesta del sistema, intenta reproducir de manera dinámica, el flujo de personas afectadas que requieren atención médica, tomando en consideración la capacidad efectiva de cada centro hospitalario, las posibilidades de desplazamiento de los heridos y las disponibilidades de medios de comunicación, entre otros.

Para la cuantificación de la vulnerabilidad sísmica del sistema sanitario se han definido diferentes factores de respuesta. El *factor de respuesta del sistema* se define en proporción al número de heridos y la evolución de la atención de la emergencia en el tiempo, afectado por un factor de riesgo del paciente. El *factor de respuesta del hospital* toma en cuenta el nivel de participación del centro en la atención de la emergencia sísmica, así como el nivel de degradación de su capacidad, cuantificada en términos del número de camas perdidas. Ambos factores permiten calificar de manera relativa el desempeño sísmico de los hospitales ante un escenario sísmico y del sistema sanitario ante diferentes escenarios equivalentes.

La implementación del modelo, permite el desarrollo de estudios de escenarios, estudios de pérdidas potenciales y análisis de riesgo sísmico. Los estudios de escenarios, permiten calificar la respuesta del sistema y de cada uno de sus elementos integrantes, para un escenario singular, de interés, asociado a escenarios históricos o simulados. Los estudios de pérdidas potenciales, permiten comparar los resultados asociados a escenarios sísmicos establecidos sobre la base de un mismo criterio, mientras que el análisis de riesgo, permite estimar los niveles probables de pérdidas acumulados, para todos los tamaños de sismos, en un período de tiempo. Estos resultados servirán de base para calificar el desempeño del sistema sanitario y de cada hospital.

La jerarquización de los niveles de riesgo sísmico a los cuales se encuentran expuestos los diferentes centros hospitalarios, permitirá racionalizar la toma de decisiones relativas a la necesidad de implementar programas de intervención y reforzamiento de instalaciones existentes, con miras a mitigar los niveles de riesgo sísmico existentes.