

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

**EVALUACIÓN PROBABILISTA DEL RIESGO SÍSMICO DE
HOSPITALES EN LIMA CON PLATAFORMA CAPRA**

Tesis para optar el Título de Ingeniero Civil, que presentan los bachilleres:

Juan Samuel Palomino Bendezú

Rodrigo Eduardo Tamayo Ly

ASESORA: Dra. Sandra Cecilia Santa Cruz Hidalgo

Lima, agosto de 2016

RESUMEN

A lo largo de la historia, los eventos sísmicos experimentados en Perú han causado grandes pérdidas económicas y humanas. El estado de la infraestructura crítica es crucial para tener una adecuada respuesta de atención de la emergencia en la ciudad. Lima, la capital del Perú, cuenta con el mayor número de hospitales y establecimientos de salud en todo el país. Esta infraestructura se ve afectada por los eventos sísmicos y la falta de mantenimiento en sus instalaciones. La Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) y el Banco Mundial iniciaron la implementación de la iniciativa CAPRA en el Perú a fines del año 2011. A través de Proyectos de Asistencia Técnica (TAPs) se estableció una alianza interinstitucional para la generación de modelos de peligro (por parte del IGP) y estimación del riesgo sísmico de colegios y hospitales de Lima. El objetivo de esta investigación es la estimación del riesgo sísmico de hospitales de Lima en términos de pérdidas económicas probables, a partir de sus componentes: peligro, exposición y vulnerabilidad. Se utiliza la metodología propuesta por CAPRA, que es compatible y equivalente a la metodología utilizada por la superintendencia de Banca y Seguros (SBS) desde el año 2005. Las etapas de investigación de este trabajo son las siguientes: recolección y revisión de datos de peligro (proporcionado por el IGP), recolección y georreferenciación de datos de hospitales y caracterización de tipologías, caracterización de vulnerabilidad de tipologías estructurales y cálculo de indicadores de riesgo (ESL, PAE y PML). Los resultados confirman el alto riesgo de los hospitales en Lima. Luego de un sismo de magnitud 8.21 con epicentro de la costa de Lima, el valor de pérdida sería de aproximadamente 26% del valor de reposición total de hospitales. La PAE representa el 2% del valor de reposición total, valor muy por encima del recomendado en el sector asegurador. Este valor es la base para establecer las primas anuales de aseguramiento de infraestructura frente a sismos.

Este estudio servirá para la definición de criterios y recomendaciones referentes a la transferencia del riesgo, planeamiento de la atención de la emergencia y financiamiento para actividades de reconstrucción post desastre. Además, los resultados también pueden ser usados en el desarrollo de planes de mitigación de riesgo de infraestructura urbana esencial.



FACULTAD DE
 CIENCIAS E
 INGENIERÍA

 PONTIFICIA
 UNIVERSIDAD
 CATÓLICA
 DEL PERÚ

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Título : "Evaluación probabilista del riesgo sísmico de hospitales en Lima con plataforma Capra".
 Área : Estructuras -Investigación-
 Asesora : Dra. Sandra Santa Cruz
 Alumno : RODRIGO EDUARDO TAMAYO LY
 Código : 2006.4499.1.412
 Alumno : JUAN PALOMINO BENDEZU
 Código : 2006.0533.0.412
 Tema N° : 280
 Fecha : Lima, 14 de setiembre de 2011



DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En los últimos años se han venido realizando diversos esfuerzos para la evaluación del riesgo de la infraestructura hospitalaria en distintos ámbitos y niveles. En el año 2009 se realizó el estudio "Diseño de Escenario sobre el Impacto de un sismo de gran magnitud en Lima Metropolitana y Callao" ejecutado por PREDES. El Ministerio de Salud ha culminado este año el estudio de vulnerabilidad de 29 establecimientos de salud utilizando el índice de seguridad hospitalaria (ISH) de la OPS. El PNUD junto con INDECI ha ejecutado el estudio SIRAD: "Recursos de respuesta inmediata y de recuperación temprana ante la ocurrencia de un sismo y/o tsunami en Lima Metropolitana y Callao" en donde se presenta el análisis de vulnerabilidad estructural y funcional de los principales establecimientos de salud de la ciudad de Lima.

Si bien estos estudios brindan herramientas para la toma de decisiones en mitigación o prevención, en la actualidad no se cuenta con un estudio de pérdidas económicas probables que permita plantear políticas y estrategias para la creación de fondos de desastres o transferencia de riesgo.

La plataforma CAPRA tiene capacidades de un sistema de información geográfica orientado al cálculo probabilista de riesgos que se puede utilizar para modelar los componentes del riesgo y su posterior evaluación.

OBJETIVOS

El **objetivo principal** de la investigación es evaluar en forma probabilística el riesgo sísmico de los hospitales de Lima Metropolitana, con la finalidad de contar con la información completa y procesada para ser utilizada como herramienta para la toma de decisiones en la gestión del riesgo.

Los **objetivos específicos** del proyecto son:

- Revisar y sistematizar la información existente.
- Levantar información priorizada de estructuras en Lima Metropolitana (Lima y Callao).



FACULTAD DE
CIENCIAS E
INGENIERÍAPONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

- Evaluar el riesgo con plataforma CAPRA-GIS.
- Recopilar información existente, dejar un catalogo en línea y en un documento.
- Priorizar intervenciones de mitigación de riesgos y/o reducción de vulnerabilidad.
- Determinar pérdidas probables con fines de financiamiento y transferencia de riesgo.

PLAN DE TRABAJOTrabajos preliminares

Revisión Bibliográfica. Reuniones con instituciones involucradas en estudios anteriores. Recopilación y procesamiento de bases de datos. Capacitación en herramienta CAPRA-GIS para evaluación de riesgo.

Trabajo de campo

Elaboración de fichas, coordinación y logística del trabajo de campo, Levantamiento de información.

Trabajo de gabinete

Digitalización y procesamiento de información levantada. Clasificación y tipología, asignación de funciones de vulnerabilidad. Ingreso de información de peligro sísmico. Estimación de pérdidas probables con plataforma CAPRA GIS.

V°B° A.S.B.
.....
Ing. Ángel San Bartolomé
Coordinador de Investigación

**NOTA**

Extensión máxima: 100 páginas.

Los alumnos elaborarán un borrador de artículo con no más de 12 hojas con fines de publicación.





*A nuestros padres y hermanos:
eternos maestros, guías y ejemplos a seguir.
A nuestras familias y amigos.*

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestro agradecimiento a Dios y nuestras familias, por el apoyo, sacrificio, soporte, fuerza y ánimo que nos dieron y sin los cuales no hubiera sido posible realizar esta tesis.

Nuestro profundo agradecimiento a la Dra. Sandra Santa Cruz, por habernos dado la oportunidad de participar en este proyecto y ser nuestra maestra, mentora y guía en el campo de la investigación y en todo momento.

Especial gratitud y consideración a los profesores Antonio Zeballos y Mauro Niño, por habernos brindado su apoyo, guía, sugerencias, y compartir su conocimiento en el campo de la ingeniería de riesgos naturales y riesgo sísmico.

Nuestro agradecimiento a los profesores Alejandro Muñoz y Nicola Tarque, por sus enseñanzas y por abrir nuestro interés y el de muchos de sus alumnos en el campo de la ingeniería sísmica.

Finalmente, nuestro agradecimiento a la PUCP, a los funcionarios del Banco Mundial, Ministerio de Salud, EsSalud, al personal de los hospitales e institutos, y los amigos por todo el apoyo brindado para la realización de este trabajo.

ÍNDICE

RESUMEN.....	i
AGRADECIMIENTOS.....	vi
ÍNDICE	vii
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABLAS	xii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 OBJETIVOS.....	2
1.2 ALCANCES	3
1.3 HIPÓTESIS.....	3
2. MARCO TEÓRICO	4
2.1 ANTECEDENTES.....	4
2.1.1 Contexto internacional: consideración de acuerdos y conceptos fundamentales	4
2.1.2 Contexto nacional: Consideraciones particulares.....	6
2.2 METODOLOGÍAS Y PROCEDIMIENTOS EXISTENTES	8
2.2.1 Metodología para determinación de la vulnerabilidad estructural en instalaciones hospitalarias (Lazares & Rios, 1996)	8
2.2.2 Inspección visual rápida de edificios para potenciales peligros sísmicos (ATC, 2002)	8
2.2.3 Lineamientos para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de hospitales (NSET, 2004)	9
2.2.4 Diagnóstico preliminar de la vulnerabilidad para establecimientos de salud en el Perú (Reque, 2006)	10
2.2.5 Atlas Nacional de Riesgos: Evaluación de la vulnerabilidad física y social (CENAPRED, 2006).....	11

2.2.6 Hospitales seguros frente a desastres: Índice de Seguridad	
Hospitalaria (ISH) (OPS, 2008)	11
2.3 ESTUDIOS REALIZADOS EN PERÚ	12
2.3.1 Diagnóstico de la vulnerabilidad sísmica en hospitales del Perú	
(OPS, 1997).....	13
2.3.2 Sistema de Información sobre Recursos para Atención de Desastres	
(SIRAD) - Atención médica en período de emergencia en el Área	
Metropolitana de Lima y Callao (INDECI-PNUD, 2010).....	13
2.3.3 Evaluación de vulnerabilidad de locales escolares y establecimientos	
de salud en Lima Metropolitana y Callao (PREDES, 2011).....	14
2.4 METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN PROBABILISTA DE RIESGOS	
NATURALES	15
3. EVALUACIÓN PROBABILISTA DEL RIESGO SÍSMICO DE HOSPITALES	18
3.1 ETAPAS DE LA INVESTIGACIÓN.....	18
3.2 ÁMBITO DE ESTUDIO	20
3.3 PELIGRO SÍSMICO.....	20
3.3.1 Tipos de estudio de peligro sísmico	23
3.3.2 Análisis probabilístico del peligro sísmico	23
3.3.3 Información sismotectónica y fuentes sísmicas.....	23
3.3.4 Recurrencia sísmica	25
3.3.5 Predicción del movimiento del suelo	27
3.3.6 Cálculo del peligro sísmico	30
3.3.7 Modificación de parámetros de peligro por efectos de sitio	31
3.4 EXPOSICIÓN	35
3.4.1 Nivel de resolución del modelo de exposición.....	36
3.4.2 Definición de variables relevantes.....	36
3.4.3 Instrumento de recolección de datos.....	37
3.4.4 Tareas previas a la recolección de datos de campo.....	38
3.4.5 Recolección de datos de campo	39
3.4.6 Caracterización de tipologías estructurales.....	40
3.4.7 Valoración económica de hospitales	42
3.4.8 Consolidación de base de datos de exposición.....	43
3.5 VULNERABILIDAD	43
3.5.1 Funciones de vulnerabilidad	45
3.5.2 Curvas de capacidad y espectros de capacidad	47
3.5.3 Niveles de daño	48

3.5.4 Estimación de la demanda inelástica	48
3.5.5 Modificación por irregularidades estructurales	49
3.5.6 Desviación estándar del daño	50
3.6 ESTIMACIÓN DEL RIESGO	51
3.6.1 Pérdida por escenario	51
3.6.2 Pérdida anual esperada (PAE).....	52
3.6.3 Pérdida máxima probable (PML).....	52
4. RESULTADOS.....	53
4.1 RESULTADOS DE ESL Y PAE.....	53
4.2 RESULTADOS DE PML	58
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y FUTURA INVESTIGACIÓN.....	60
5.1 CON RESPECTO A LOS ESTUDIOS EXISTENTES	60
5.2 CON RESPECTO A LA RECOLECCIÓN DE DATOS DE CAMPO Y LA BASE DE DATOS	60
5.3 CON RESPECTO A LA CARACTERIZACIÓN DE LA VULNERABILIDAD	60
5.4 CON RESPECTO A LA EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO, LOS INDICADORES OBTENIDOS Y LA METODOLOGÍA CAPRA	61
6. REFERENCIAS.....	62
7. ANEXOS.....	71
LISTA DE FIGURAS EN ANEXOS	1
LISTA DE TABLAS EN ANEXOS.....	2
ANEXO I. DEFINICIONES Y CONCEPTOS	3
ANEXO II. METODOLOGÍAS Y PROCEDIMIENTOS EXISTENTES	4
ANEXO III. ESTUDIOS REALIZADOS.....	16
ANEXO IV. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES	23
ANEXO V. VARIABLES PARA LA CARACTERIZACIÓN DE TIPOLOGÍAS	25
ANEXO VI. CREDENCIAL Y PERMISO PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS DE HOSPITALES.....	28
ANEXO VII. LISTA DE INFORMACIÓN ENTREGADA POR HOSPITAL	31
ANEXO VIII. FORMULARIO DE RECOLECCIÓN DE DATOS	33
ANEXO IX. DESCRIPCIÓN DE TIPOLOGÍAS ESTRUCTURALES	35
ANEXO X. CAMPOS OBLIGATORIOS, CAMPOS GENERADOS Y METADATOS DE LA BASE DE DATOS	37
ANEXO XI. BASE DE DATOS DE EXPOSICIÓN DE HOSPITALES DE LIMA	40
ANEXO XII. PANEL FOTOGRÁFICO DE HOSPITALES POR PABELLÓN	41
ANEXO XIII. FUNCIONES DE VULNERABILIDAD.....	42

ANEXO XIV. MAPAS DE PAE POR HOSPITAL..... 43



LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Metodología de estimación probabilista del riesgo (ERN-AL, 2010)	17
Figura 3.1. Etapas de la investigación (Santa-Cruz, 2013)	19
Figura 3.2. Distribución de hospitales en Lima Metropolitana	22
Figura 3.3. Los cuatro pasos de un PSHA (Kramer, 1996)	24
Figura 3.4. Ejemplos de distintas geometrías de fuentes sísmicas: a) fuente puntual, b) fuente lineal, c) fuente tridimensional (Kramer, 1996)	24
Figura 3.5. Fuentes sísmicas propuestas por el IGP: (a) subducción superficial, (b) fallas superficiales, (c) subducción profunda (Santa-Cruz, 2013)	25
Figura 3.6. Definición de escenario sísmico	26
Figura 3.7. Ordenadas espectrales para sismos de diferente magnitud en el centro de Lima, con epicentro a 50 km de distancia	29
Figura 3.8. Mapa de isosistas para sismo de $M_w=8.21$ a 50 km del centro de Lima	29
Figura 3.9. Tasa de excedencia de intensidades y espectro de peligro uniforme para el centro de la Ciudad de Lima calculados con el programa CRISIS2007 (Santa-Cruz, 2013)	31
Figura 3.10. Ejemplo de función de amplificación típica para suelos blandos (ERN-AL, 2010)	32
Figura 3.11. Mapa de microzonificación de Lima Metropolitana. (INDECI-PNUD, 2010)	33
Figura 3.12. Distribución del número de pabellones por hospital en Lima Metropolitana	36
Figura 3.13. Ejemplo de nomenclatura de pabellones: (a) pabellones del Hospital Daniel Alcides Carrión y (b) definición de nomenclatura (en letras rojas)	39
Figura 3.14. Recolección de datos de campo utilizando dispositivos electrónicos: (a) georreferenciación, (b) base de datos, (c) fotografía del hospital, (d) entorno multitarea	40
Figura 3.15. Representación típica de una función de vulnerabilidad	46
Figura 3.16. Ejemplo de curva de capacidad de un edificio (FEMA, 2011)	47
Figura 4.1. Curva PML para hospitales de Lima	59

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Índice de Seguridad Hospitalaria y medidas recomendadas (OPS, 2008).....	12
Tabla 2.2. Vulnerabilidad estructural SIRAD (INDECI-PNUD, 2010)	14
Tabla 3.1. Lista de hospitales evaluados	21
Tabla 3.2. Pseudoaceleraciones en el centro de Lima, a 50 km del epicentro	28
Tabla 3.3. Parámetros del suelo (según RNE NTE E.030, 2003) y zonificación del suelo (según INDECI-PNUD, 2010).....	34
Tabla 3.4. Grupos de información en base de datos de exposición	37
Tabla 3.5. Ventajas y desventajas de tipos de instrumento de recolección de datos	38
Tabla 3.6. Descripción de variables de las tipologías	41
Tabla 3.7. Tipologías de hospitales de Lima Metropolitana.....	41
Tabla 3.8. Costo de reposición por metro cuadrado de área construida de hospitales.....	42
Tabla 3.9. Características generales de la base de datos	43
Tabla 3.10. Equivalencia de tipologías y características estructurales utilizadas	45
Tabla 3.11. Factores de modificación por irregularidad estructural	50
Tabla 4.1. Niveles de riesgo definidos	53
Tabla 4.2. Resultados de PAE y ESL por tipología estructural.....	54
Tabla 4.3. PAE por hospital.....	55
Tabla 4.4. ESL por hospital	56
Tabla 4.5. PAE y ESL por distrito.....	57
Tabla 4.6. PAE y ESL por tipo de suelo	58
Tabla 4.7. PAE y ESL por administración hospitalaria.....	58
Tabla 4.8. PML tabulada para diferentes periodos de retorno.....	58

1. INTRODUCCIÓN

El Perú se encuentra ubicado en el Cinturón de Fuego del Pacífico, zona que experimenta el fenómeno de subducción de las placas Nasca y Sudamericana. En esta zona se han generado eventos sísmicos de gran magnitud a lo largo de la historia, que han ocasionado cuantiosos daños materiales y pérdida de vidas humanas. Además, los efectos de este fenómeno pueden variar dependiendo de las condiciones de sitio que se presenten en un determinado lugar (INDECI-PNUD, 2010).

Dentro de este contexto, en los últimos setenta años la infraestructura hospitalaria en el Perú ha sido afectada por la ocurrencia de sismos, y en especial la ciudad de Lima, que cuenta con la mayor cantidad de hospitales del país (OPS, 1997). El funcionamiento de los hospitales después de la ocurrencia de desastres es esencial para dar una respuesta adecuada de atención a la emergencia (OPS, 2008). Por ello, en años anteriores se han realizado diversos esfuerzos a nivel nacional para evaluar el riesgo de hospitales en distintos ámbitos y niveles (Lazares & Rios, 1996; OPS, 1997; Reque, 2006; INDECI-PNUD, 2010; PREDES, 2011). Dichos aportes constituyen herramientas útiles para la toma de decisiones en mitigación o prevención de desastres.

Sin embargo, en la actualidad no se cuenta con un estudio de pérdidas económicas probables de hospitales, por la falta de información y datos necesarios para desarrollar modelos de estimación de pérdidas. Como consecuencia de ello, las políticas encaminadas hacia la reducción del riesgo no reciben la atención que realmente requieren. Esto limita la capacidad del país para evaluar qué tan deseables son las herramientas de planeamiento para hacer frente al riesgo (Cardona, 2009). Las herramientas necesarias para el financiamiento del riesgo requieren que este sea razonablemente cuantificado como condición previa a su empleo (BID, 2002).

Ante la necesidad de evaluar el riesgo de manera probabilista y en términos de pérdidas económicas probables surge el Enfoque Integral para la Evaluación Probabilista del Riesgo (CAPRA, por sus siglas en inglés: *Comprehensive Approach for Probabilistic Risk Assessment*). La iniciativa CAPRA constituye una plataforma de información para apoyar la toma de decisiones en la gestión del riesgo ante desastres naturales como sismos. CAPRA aplica los principios de la evaluación probabilista del riesgo a partir de sus componentes: peligro, vulnerabilidad y exposición. Los resultados de los análisis desarrollados a través de CAPRA son expresados en métricas probabilísticas, como la Pérdida Anual Esperada (PAE) o Pérdida Máxima Probable (PML) para diferentes periodos de retorno. A su vez, CAPRA permite la visualización del peligro, exposición y riesgo en un Sistema de Información Geográfica (GIS, por sus siglas en inglés) (Cardona, et al., 2012).

Considerando la necesidad de contar con una mejor información acerca de la infraestructura esencial y el riesgo sísmico nacional, la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) y el Banco Mundial (BM) firmaron un Memorándum de Entendimiento en setiembre de 2011, con el fin de colaborar con el desarrollo y financiamiento de actividades de la iniciativa CAPRA en el país. En este marco se desarrolló el Proyecto de Asistencia Técnica (TAP) para la evaluación probabilística del riesgo sísmico de hospitales y locales escolares en la ciudad de Lima.

El presente trabajo de investigación está vinculado a la iniciativa CAPRA, y en este informe se muestra la metodología seguida y los resultados de la evaluación del riesgo sísmico en los hospitales de Lima utilizando la plataforma y metodología propuesta por CAPRA. Esto permitirá contar con información completa y procesada que podrá ser utilizada como herramienta en la toma de decisiones para la gestión del riesgo, y en futuras investigaciones relacionadas con el riesgo sísmico de hospitales.

1.1 OBJETIVOS

El objetivo general de la investigación es evaluar de forma probabilista el riesgo sísmico de los hospitales de Lima Metropolitana en términos de pérdidas económicas probables.

Los objetivos específicos de la investigación son:

- Revisar y sistematizar la información existente acerca del riesgo sísmico de hospitales

- Recolectar datos de infraestructura hospitalaria en campo y definir tipologías estructurales
- Caracterizar la vulnerabilidad estructural de las tipologías definidas con métodos simplificados
- Evaluar el riesgo sísmico en términos de pérdidas probables con la plataforma CAPRA-GIS

1.2 ALCANCES

Se evaluará el riesgo sísmico de hospitales en términos de pérdidas probables en Lima Metropolitana. La recolección de datos de infraestructura hospitalaria fue realizada por medio de inspecciones visuales técnicas y con ayuda de dispositivos móviles. Para la caracterización de la vulnerabilidad de las tipologías estructurales se utilizaron métodos analíticos aproximados y simplificados, teniendo en cuenta gran el número de edificaciones a ser evaluadas. El riesgo en términos de pérdidas probables fue evaluado utilizando el software CAPRA-GIS y otros programas desarrollados por la iniciativa CAPRA, explicada en el acápite 2.4.

1.3 HIPÓTESIS

Es posible evaluar el riesgo sísmico de hospitales en términos de pérdidas económicas probables a partir del peligro sísmico asociado, la recolección y procesamiento de información existente, y la caracterización de la vulnerabilidad.

2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se revisan y describen los antecedentes, las metodologías y procedimientos existentes desarrollados para la estimación de la vulnerabilidad hospitalaria, y los estudios realizados a la fecha acerca del tema. En el ANEXO I se presentan definiciones y conceptos relacionados a la evaluación de riesgo sísmico, que facilitarán la lectura y el entendimiento de este trabajo.

2.1 ANTECEDENTES

La estimación del riesgo de desastres como parte del proceso de gestión de riesgos ha evolucionado a lo largo del tiempo. Para dar cuenta de esta evolución, es necesario abordarla dentro de un contexto más amplio: el de la gestión del riesgo. En este primer punto se abordará los acuerdos, políticas y medidas a nivel global, regional y nacional que dan cuenta de la importancia de la gestión del riesgo.

2.1.1 Contexto internacional: consideración de acuerdos y conceptos fundamentales

La creación del Decenio Internacional para la Reducción de los Desastres Naturales (DIRDN) en 1989 marca el inicio de las medidas orientadas a la reducción del riesgo de desastres a nivel internacional impulsado desde la Organización de las Naciones Unidas (ONU) y que desde el año 2001 establece la Estrategia Internacional de Reducción de Desastres (EIRD o ISDR por sus siglas en inglés). Las Conferencias Mundiales sobre la Reducción de los Desastres en Yokohama en el año 1994, Hyogo en 2005 y Sendai en 2015 han recogido y concluido en documentos que constituyen el marco de referencia de las políticas a nivel nacional.

Por un lado, el Marco de Acción de Hyogo (MAH) 2005-2015 (United Nations-ISDR, 2005) señala la importancia de la resiliencia de las naciones y las comunidades ante los desastres. Este documento constituye un hito al determinar las líneas directrices

de la reducción del riesgo de desastres a nivel global a través de cinco prioridades de acción:

1. Garantizar que la Reducción de Desastres Naturales sea una prioridad nacional y local con una sólida base institucional para su aplicación.
2. Identificar, evaluar y monitorear los riesgos de desastres y mejorar las alertas tempranas.
3. Utilizar el conocimiento, la innovación y la educación para crear una cultura de seguridad y resiliencia, a todo nivel.
4. Reducir los factores de riesgo subyacentes.
5. Fortalecer la preparación en caso de desastre, a fin de asegurar una respuesta eficaz a todo nivel.

El Marco de Acción de Hyogo como instrumento a nivel internacional ha sido integrado en la política nacional sobre la gestión de riesgos de desastre y hace especial hincapié en la capacidad de las sociedades de hacer frente a los desastres como factor de cambio en la percepción del riesgo, según propone la Ecuación (2.1) (D'Ercole & Metzger, 2009).

$$\text{Riesgo} = \text{Peligro} \times \text{Vulnerabilidad} \quad (2.1)$$

A partir de este documento se estableció una Plataforma Global con participación de actores de diferentes sectores de desarrollo de la gestión del riesgo de desastres. Las reuniones de los años 2007, 2009 y 2011 han tenido el objetivo de ampliar el espacio político dedicado por los gobiernos a este tema, así como al logro de las Metas de Desarrollo del Milenio (DIPECHO/INDECI, 2012).

Siguiendo esta línea, el Marco de Acción de Sendai (MAS) para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030 (Aitsi-Selmi, et al., 2015), que constituye el instrumento sucesor del Marco de Acción de Hyogo, tiene como meta “la reducción sustancial del riesgo de desastres, la pérdida de vidas, medios de subsistencia y salud, así como el deterioro del patrimonio económico, físico, social, cultural y ambiental de la población” en los próximos 15 años. Para ello, reafirma “la necesidad de anticipar, planificar y reducir el riesgo para proteger más eficazmente a la población, comunidades y países y así construir resiliencia”

Este nuevo marco de largo alcance señala cuatro prioridades de acción que requieren la participación, compromiso y liderazgo político de cada país:

1. Comprensión del riesgo de desastres
2. Fortalecimiento de la gobernanza para gestión del riesgo de desastres
3. Énfasis en la resiliencia y la reducción del riesgo de desastres
4. Optimización de la prevención de desastres para una respuesta efectiva y eficaz en términos de recuperación, rehabilitación y reconstrucción.

Los objetivos globales en los próximos 15 años están orientados a la reducción significativa de la mortalidad para el año 2030, además de una disminución de los damnificados y de las pérdidas económicas derivadas de los desastres. También apunta a un descenso de los daños de infraestructura crítica y servicios básicos, entre ellos la salud y la educación. Por último, y para alcanzar los objetivos antes mencionados, se busca incrementar el número de países con estrategias para la reducción del riesgo de desastres a nivel nacional y local, la cooperación internacional y el acceso a Información sobre evaluaciones de riesgo y sistemas de alerta temprana.

A nivel subregional, el Comité Andino para la Prevención y Atención de Desastres (CAPRADE), desde el año 2001 ha adoptado una Estrategia Andina de Prevención y Atención de Desastres, que a partir del año 2009 está en concordancia con el Marco de Acción de Hyogo.

2.1.2 Contexto nacional: Consideraciones particulares

La situación particular del territorio peruano en el contexto tectónico global, ha implicado una serie de medidas de parte de las instituciones públicas y privadas. A esto se suma el proceso de expansión urbana que conduce a la ocupación de los suelos inadecuados (Kuroiwa, 2004).

La evolución del riesgo de desastres en el Perú está marcada por dos tipos de eventos que se suceden en el tiempo: los desastres naturales y las políticas frente a ellos. La tragedia de Yungay en mayo 1970 marca el inicio de las políticas de atención y gestión de crisis. Luego, el 28 de marzo de 1972, el Decreto Ley 19338 crea el Sistema de Defensa Civil (SIDECI, más tarde SINADECI). Este decreto, que promulga la Ley de Gestión de Desastres, considera el desastre como una situación natural en la que los actores se comportan de forma reactiva ante un desastre inminente.

Este sistema, vigente hasta el año 2011, carecía de mecanismos para asegurar que las autoridades cumplan sus funciones dentro del marco regulador de la función pública así como una tendencia al ignorar la delimitación de responsabilidades entre los niveles sectorial, regional, provincial y distrital (DIPECHO/INDECI, 2012).

Finales del siglo 20 y principios del 21 SINADECI se caracteriza por reestructurar en un contexto que tiene dos procesos: el interior, la llegada de nuevos actores, como el PNUD, marca el inicio de una etapa de colaboración empresas públicas y privadas, en los que la cooperación y las ONG internacionales tienen cada vez más importancia, y el otro lado, un proceso de descentralización que marca el regreso de los actores en el escenario político e institucional local. Entre las medidas adoptadas en respuesta a los desastres, es importante tener en cuenta lo siguiente (DIPECHO/INDECI, 2012):

- a) - La creación de la Comisión Ejecutiva de la reconstrucción de El Niño - CEREN es la antesala de la subida del Instituto Nacional de Defensa Civil - INDECI en SINADECI. Entre la inundación de 1998 en Ica y el terremoto en Arequipa 2001 es INDECI quien coordina la gestión de la crisis y comenzó una campaña para la prevención de desastres.
- b) - La creación del Programa de Ciudades Sostenibles como un proyecto INDECI - PNUD constituye una sociedad muy productiva y marca un desarrollo en tres dimensiones: en primer lugar, una dimensión técnica en el campo de los estudios de investigación y desarrollo orientados a medir y caracterizar el riesgo, luego una dimensión social, que tiene como objetivo la difusión de los conocimientos sobre los peligros a nivel nacional y, finalmente, una dimensión político- institucional, que busca integrar a los actores locales en el proceso de prevención.

El último período es marcado por el terremoto de 2007, ha puesto de manifiesto los problemas del sistema, obligando a considerar una visión diferente del problema y allanó el camino para un cambio de paradigma en el riesgo más allá del desastre (DIPECHO/INDECI, 2012):

- a) La creación del Fondo para la Reconstrucción del Sur - FORSUR con actuación cuestionable que marca el inicio y el final de la intervención de los actores privados en la crisis.
- b) La modificación al Código Nacional de Construcción del Código Nacional de las construcciones, debido a la presión de los actores públicos (universidades y la sociedad civil) para desarrollar el nivel técnico de los sistemas de construcción tradicionales y el derecho y la vivienda rural, con el objetivo de incorporar la tecnología y el conocimiento local. Esto implica la reestructuración total del código y la incorporación de medidas para regular la auto- construcción.
- c) La creación del Sistema Nacional de Desastres y Gestión de Riesgos - SINAGERD (que sustituye a la SINADECI) y las instituciones de apoyo: el

Centro Nacional para la Prevención y Reducción de la Estimación del Riesgo de Desastres - Planificación Estratégica CENEPRED y Central - CEPLAN que conjuntamente con INDECI, son los pilares de SINAGERD.

2.2 METODOLOGÍAS Y PROCEDIMIENTOS EXISTENTES

En el Perú y otras partes del mundo se han desarrollado diferentes procedimientos y metodologías para la evaluación de infraestructura hospitalaria. En este acápite se describen brevemente algunas metodologías desarrolladas a la fecha, tanto para la inspección visual de hospitales como para otros tipos de edificaciones.

2.2.1 Metodología para determinación de la vulnerabilidad estructural en instalaciones hospitalarias (Lazares & Rios, 1996)

Esta metodología fue desarrollada para identificar hospitales estructuralmente vulnerables ante de sismos. El proceso de inspección requiere la identificación de los pabellones según su sistema constructivo y la posterior recolección de datos de cada pabellón. Luego de la recopilación de información se procede a clasificar a cada pabellón según sus características sismoresistentes. La tipología definida se basa en la Escala de Intensidades Mercalli Modificada para países Andinos (Kuroiwa & Lazares, 1997). Finalmente, en base a la evaluación cualitativa de las características estructurales de la edificación, se califica a cada una de ellas con un nivel de vulnerabilidad: bajo, medio o alto. En el ANEXO II se muestra el resumen de la metodología descrita y el formulario de recolección de datos correspondiente a edificios de concreto armado.

2.2.2 Inspección visual rápida de edificios para potenciales peligros sísmicos (ATC, 2002)

Esta metodología se basa en una observación visual del edificio desde el exterior, y si es posible, del interior. Primero se determina la sismicidad de la región (alta, moderada o baja) en donde se está realizando la inspección. A partir de ello, se asigna un puntaje de peligro estructural básico (dependiendo del peligro sísmico de la zona) de acuerdo al tipo de edificación. El puntaje asignado es posteriormente modificado, utilizando factores de modificación de desempeño, que se suman o restan al puntaje de peligro estructural básico para obtener al puntaje final estructural. En el ANEXO II se muestran los puntajes estructurales básicos y factores modificadores según el sistema estructural.

El puntaje final estructural se encuentra dentro del rango de 0 a 7, donde el mayor puntaje representa un mejor desempeño sísmico esperado. Este puntaje separa a las edificaciones en dos categorías: aquellas que se espera que tengan un desempeño sísmico aceptable y aquellas que pudieran ser sísmicamente peligrosas y deben ser estudiadas con más detalle. Se considera el puntaje $S = 2$ como el “punto de corte”, donde los edificios con un puntaje menor o igual a 2 presentarán un potencial peligro sísmico y deben ser investigados por un profesional de diseño con experiencia en diseño sísmico. Esta metodología utiliza un formulario de recolección de datos que se muestra en el ANEXO II. Esta metodología es una actualización del reporte ATC-21, (ATC, 1988).

2.2.3 Lineamientos para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de hospitales (NSET, 2004)

La Sociedad Nacional de Tecnología Sísmica de Nepal (NSET, por sus siglas en inglés), con apoyo de la Organización Mundial de la Salud (OMS), desarrolló en el año 2004 una herramienta para evaluar la vulnerabilidad sísmica de hospitales en Nepal. La metodología propuesta por NSET está basada en los tipos, sistemas estructurales y componentes no estructurales de instalaciones hospitalarias. La herramienta fue desarrollada para ser usada en Nepal, sin embargo se propone la extensión de su uso para otros países del Sur de Asia que tengan condiciones similares.

La evaluación del componente estructural sigue los pasos descritos a continuación:

- d) Identificación del tipo de estructura, puede ser de adobe, albañilería, pórticos de concreto u otro tipo.
- e) Selección de la correspondiente función de vulnerabilidad según el tipo de edificación. Se define el grado de daño de cada tipo de edificación para los diferentes niveles de intensidad sísmica.
- f) Identificación de los factores de vulnerabilidad. Los factores de vulnerabilidad son parámetros que influyen el comportamiento en conjunto de la edificación, y son determinados a partir de la inspección visual y el trabajo de gabinete.
- g) Verificación de las condiciones de esfuerzo en algunos componentes estructurales por medio de cálculos matemáticos.
- h) Identificación de la influencia de los factores de vulnerabilidad en el comportamiento sísmico de la estructura.

- i) Declaración de la seguridad estructural de la edificación, según el daño esperado para cada tipo de estructura para una determinada intensidad
- j) Identificación de las opciones de intervención estructural. A pesar de que no es posible realizar un diseño específico de las mejoras necesarias en cada edificio, se debe identificar las opciones de intervención en construcciones clasificadas como débiles, para saber si es necesaria la reconstrucción del edificio o si son necesarias otro tipo de mejoras.

En el ANEXO II se presentan los tipos estructurales y factores de vulnerabilidad de la metodología propuesta.

2.2.4 Diagnóstico preliminar de la vulnerabilidad para establecimientos de salud en el Perú (Reque, 2006)

La Oficina General de Defensa Nacional del Ministerio de Salud (MINSA) desarrolló en el año 2006 una metodología para la evaluación preliminar de la vulnerabilidad en establecimientos de salud a nivel nacional. La metodología consiste en la evaluación del estado de cada uno de los edificios que forman parte de un establecimiento de salud (pabellones), mediante el estudio de los planos existentes actuales y una inspección visual rápida. Se evalúan cualitativamente la vulnerabilidad de tres componentes principales: estructurales, no estructurales y funcionales, mediante el método de inspección y puntaje.

La vulnerabilidad estructural se estima a partir de una inspección visual técnica, en la cual se determinan las principales características estructurales de los edificios evaluados. Con esta información, se asigna a la estructura una curva esfuerzo-deformación según los sistemas estructurales existentes en establecimientos de salud (pórticos de concreto armado, muros de concreto, albañilería, adobe, entre otros). La demanda sísmica es estimada a partir de la zonificación y tipo de suelo, según lo estipulado en la norma sísmica correspondiente (RNE NTE E.030, 2003). El desempeño del edificio es calculado de manera aproximada con la curva de capacidad asignada, y puede ser castigado según las irregularidades estructurales encontradas en el edificio (irregularidades en planta, en altura, columnas cortas, piso blando, deterioro, etc.). Finalmente, se asigna el nivel de vulnerabilidad de la estructura según la sectorización de su curva de capacidad.

La vulnerabilidad no estructural es estimada a partir de la evaluación de los componentes arquitectónicos y mobiliario, cuya falla o mal funcionamiento por la ocurrencia de un sismo representen un riesgo para la vida de los ocupantes del

edificio. La vulnerabilidad funcional es estimada según la distribución de las áreas de servicio, la existencia de planes de emergencia en el hospital, la correcta señalización y funcionamiento de los sistemas de evaluación, comunicación y vías de escape. Esta evaluación debe ser llevada a cabo por un equipo técnico en arquitectura, ingeniería y seguridad, según el personal con que cuente el hospital y previa capacitación. En el ANEXO II se muestra el formulario de recolección de datos correspondiente al componente estructural.

2.2.5 Atlas Nacional de Riesgos: Evaluación de la vulnerabilidad física y social (CENAPRED, 2006)

En este trabajo se presenta una metodología para evaluar cualitativamente la vulnerabilidad de viviendas ante la acción de sismos. Se utilizan funciones de vulnerabilidad, a partir de la correspondiente clasificación de sistemas expuestos. La clasificación de tipos de vivienda requiere de una inspección de campo, vivienda por vivienda, o bien un muestreo de los diferentes materiales y sistemas estructurales empleados en la construcción de viviendas. Los tipos de vivienda propuestos se muestran en la Tab. 6 del ANEXO II.

Para la evaluación del riesgo sísmico de viviendas, una vez definida la zona de estudio se clasifican las viviendas de dicha zona con ayuda del “Formato de identificación para tipología de vivienda”, que se muestra en el ANEXO II. Luego, se conforma una base de datos en formato GIS. En esta metodología, las funciones de vulnerabilidad para estructuras de mampostería destinadas a vivienda expresan la vulnerabilidad en términos del daño físico que puede causar un sismo. El parámetro de intensidad es la aceleración espectral del suelo para un determinado periodo estructural. El índice de vulnerabilidad será asignado según el daño físico de la vivienda.

2.2.6 Hospitales seguros frente a desastres: Índice de Seguridad Hospitalaria (ISH) (OPS, 2008)

El Grupo Asesor sobre la Mitigación de Desastres (DiMAG) desarrolló en el año 2008 una herramienta de bajo costo denominada “Índice de Seguridad Hospitalaria” para medir y clasificar rápidamente el nivel de seguridad de una instalación de salud. Para la aplicación de esta metodología fue desarrollado el “Formulario para la evaluación de hospitales seguros” que se muestra en el ANEXO II.

El formulario sirve para recopilar datos relevantes del hospital, tales como: información general sobre el nivel de complejidad de cada una de las instalaciones, la población a

la que se presta servicios, la cantidad de miembros del personal, las amenazas naturales que imperan en la zona y los antecedentes de los desastres. Además, se miden los aspectos que contribuyan a la seguridad de la instalación: componentes estructurales (muros de carga, cimientos, columnas, etc.), componentes no estructurales (elementos arquitectónicos tales como equipo de laboratorio, mobiliario, sistemas de ventilación o eléctricos, etc.) y elementos organizativos o funcionales.

La seguridad de cada componente del formulario de evaluación tiene una ponderación y puede ser calificada como alta, media o baja, según una serie de estándares predeterminados descritos en el formulario. Finalmente, con la suma ponderada se obtiene el Índice de Seguridad Hospitalaria (valor entre 0 y 1) y según el valor del índice se establecen categorías y recomendaciones a tomar en cuenta (Tabla 2.1).

Tabla 2.1. Índice de Seguridad Hospitalaria y medidas recomendadas (OPS, 2008)

Índice de Seguridad	Categoría	Medidas
0 – 0.35	C	Se requieren medidas urgentes de manera inmediata, ya que los niveles actuales de seguridad del establecimiento no son suficientes para proteger la vida de los pacientes y el personal durante y después de un desastre.
0.36 – 0.65	B	Se requieren medidas necesarias en el corto plazo, ya que los niveles actuales de seguridad del establecimiento pueden potencialmente poner en riesgo a los pacientes, el personal y su funcionamiento durante y después de un desastre.
0.66 – 1	A	Aunque es probable que el hospital continúe funcionando en caso de desastres, se recomienda continuar con medidas para mejorar la capacidad de respuesta y ejecutar medidas preventivas en el mediano y largo plazo, para mejorar el nivel de seguridad frente a desastres.

El MINSA culminó durante el año 2011 el estudio de vulnerabilidad de 29 establecimientos de salud utilizando el Índice de Seguridad Hospitalaria, de los cuales 16 fueron hospitales de Lima Metropolitana. Sin embargo no se cuenta con los resultados de dicha evaluación, y la estimación de vulnerabilidad estructural no fue realizada a nivel de edificación sino a nivel global del hospital.

2.3 ESTUDIOS REALIZADOS EN PERÚ

En el Perú se han realizado estudios previos que evalúan el riesgo de hospitales y establecimientos de salud en las ciudades más importantes a nivel nacional. En este acápite se describen brevemente las metodologías y resultados obtenidos en dichos estudios.

2.3.1 Diagnóstico de la vulnerabilidad sísmica en hospitales del Perú (OPS, 1997)

La Organización Panamericana de la Salud (OPS) y el Ministerio de Salud llevaron a cabo durante los años 1996 y 1997 el diagnóstico de la vulnerabilidad estructural, no estructural y funcional de 13 hospitales seleccionados a nivel nacional. Se seleccionaron a los hospitales considerados como los más importantes para la atención de desastres. Fueron analizados los pabellones esenciales para el funcionamiento de los hospitales en situación de emergencia (pabellones de cuidados intensivos, emergencia, centro quirúrgico, entre otros). El análisis del componente estructural fue llevado a cabo por el Centro Peruano-Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID).

Para la elaboración del estudio fue recopilada la información existente acerca de la estructura de cada edificio que conforman los hospitales (planos, reportes de obra, estudios previos). En base a dicha información fue desarrollado un modelo matemático de cada estructura. También fueron realizados estudios geotécnicos y estudios de las condiciones actuales de los materiales. Con los datos de los modelos calibrados e información de los planos y estudios adicionales, se realizó un análisis dinámico lineal y se verificaron los límites de desplazamiento de cada edificio seleccionado.

De los hospitales evaluados, cinco pertenecen a Lima Metropolitana. Se debe tener en cuenta que la cantidad de pabellones analizados en cada hospital representa solo una fracción del total de área construida, y que la evaluación de vulnerabilidad estructural se realizó tanto en base a los criterios del código de diseño sismorresistente de 1977 como a los del código de 1997 (RNE NTE E.030, 1997). Los resultados del análisis del componente estructural obtenidos en este estudio (hospitales de Lima) se muestran en el ANEXO III.

2.3.2 Sistema de Información sobre Recursos para Atención de Desastres (SIRAD) - Atención médica en período de emergencia en el Área Metropolitana de Lima y Callao (INDECI-PNUD, 2010)

El Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y el Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI) desarrollaron en el año 2010 el Sistema de Información sobre Recursos para Atención de Desastres (SIRAD). El estudio tuvo como objetivo evaluar los recursos de respuesta inmediata y de recuperación temprana ante la ocurrencia de un sismo y/o tsunami en Lima Metropolitana. Se evaluó la vulnerabilidad física y funcional de diversos componentes de infraestructura de la ciudad.

Como parte del estudio se presentó el análisis de vulnerabilidad estructural de 23 hospitales en Lima y la vulnerabilidad funcional y capacidad de atención ante desastres de varios centros de salud. La evaluación fue realizada a nivel de pabellón, y fueron seleccionados aquellos más importantes y de funcionamiento esencial para la atención de desastres en los hospitales. La vulnerabilidad estructural de cada hospital fue definida en función del porcentaje de estructura potencialmente perdida sobre el porcentaje total evaluado (Tabla 2.2), considerando solo los pabellones evaluados para el cálculo de la superficie total.

Tabla 2.2. Vulnerabilidad estructural SIRAD (INDECI-PNUD, 2010)

Vulnerabilidad estructural por hospital		% de pérdida de funcionalidad de la superficie total por hospital
A	Baja	Menos de 10 %
B	Media	Entre 10 y 20 %
C	Alta	Entre 20 % y 40 %
D	Muy alta	Superior a 40 %

El índice de vulnerabilidad obtenido tomó en cuenta propiedades dinámicas de los edificios a través de un análisis de las frecuencias fundamentales en dirección longitudinal y transversal del edificio. No se realizaron mediciones de la deformación modal de las estructuras. La lista de hospitales evaluados se muestra en el ANEXO III.

2.3.3 Evaluación de vulnerabilidad de locales escolares y establecimientos de salud en Lima Metropolitana y Callao (PREDES, 2011)

En el año 2009, el Centro de Estudios y Prevención de Desastres (PREDES) con apoyo de la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE), llevó a cabo la evaluación de vulnerabilidad de escuelas y establecimientos de salud en Lima. Para dicha evaluación se utilizó la metodología propuesta por la Agencia Mundial para Monitoreo Planetario y Reducción del Riesgo Sísmico (WAPMERR). El nivel de vulnerabilidad (V_i) fue determinado a partir del sistema constructivo y características de los elementos estructurales en cada edificación, utilizando un formulario de evaluación visual rápida (ver ANEXO III).

El estudio comprendió la evaluación de 651 locales educativos públicos y privados y 41 establecimientos de salud, lo que corresponde a una muestra del 10% del universo de establecimientos. Se debe tener en cuenta que esta evaluación presenta el

resultado de la vulnerabilidad global, es decir del conjunto de pabellones que conforman cada hospital, ponderando la calificación de acuerdo al número de pabellones con determinado sistema estructural y su área construida. . Los resultados de esta evaluación se muestran en el ANEXO III.

2.4 METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN PROBABILISTA DE RIESGOS NATURALES

La metodología para la evaluación probabilista del riesgo sísmico empleada en esta investigación sigue los lineamientos de la iniciativa CAPRA (ERN-AL, 2010; Cardona, et al., 2010; Cardona, et al., 2011; Cardona, et al., 2012). CAPRA es una iniciativa impulsada por un conjunto de instituciones internacionales (CEPREDENAC, EIRD, BID, BM), cuya metodología y plataforma de trabajo fue desarrollada por el Consorcio ERN - Evaluación de Riesgos Naturales de América Latina. Está basada en formulaciones probabilistas que incorporan la incertidumbre asociada a la estimación de la severidad y frecuencia de recurrencia de desastres en la estimación del riesgo. A la fecha ha sido utilizada en la modelación probabilista de riesgo sísmico, estimación holística del riesgo sísmico, priorización de intervenciones de reducción de riesgo sísmico, cálculo híbrido de excedencia de pérdidas, riesgo de tsunami inducido por sismos, entre otros usos; tanto a nivel local como regional; y en sectores como vivienda, educación, transporte, entre otros (Marulanda, et al., 2013; Carreño, et al., 2014; Velásquez, et al., 2014; Mora, et al., 2015; Jaimes, et al., 2016).

La herramienta de trabajo de CAPRA es la plataforma de software CAPRA-GIS, un sistema de información geográfica orientado al cálculo probabilista de riesgos a partir de sus componentes: amenaza, exposición y vulnerabilidad, los cuales son modelados previamente al análisis de riesgos. La descripción de los componentes es la siguiente:

- a) Evaluación de la amenaza: Para cada uno de los peligros considerados, se define un conjunto de eventos, con sus respectivas frecuencias de ocurrencia, que representan de manera integral la amenaza correspondiente. Cada escenario contiene la distribución espacial de parámetros que permiten construir la distribución de probabilidad de las intensidades producidas por su ocurrencia.
- b) Definición del inventario de elementos expuestos: debe definirse el inventario de elementos expuestos, el cual debe especificar la localización geográfica del bien expuesto más los siguientes parámetros, que califican al elemento:
 - Localización geográfica del bien

- Valor físico o costo de reposición
 - Valor humano o número de ocupantes estimado
 - Clase estructural a la que pertenece
- c) Vulnerabilidad de las construcciones: debe asignarse a cada una de las clases estructurales una función de vulnerabilidad para cada tipo de amenaza. Esta función caracteriza el comportamiento de la construcción durante la ocurrencia de fenómenos amenazantes. Las funciones de vulnerabilidad definen la distribución de probabilidad de las pérdidas como función de la intensidad producida durante un escenario específico. Se definen mediante curvas que relacionan el valor esperado del daño y la desviación estándar del daño con la intensidad del fenómeno.

Con base en los modelos de amenaza, el inventario de activos expuestos y las funciones de vulnerabilidad correspondientes, es posible desarrollar un modelo de análisis de riesgo probabilista en una zona de estudio determinada. La Figura 2.1 presenta el esquema general del modelo probabilista de evaluación del riesgo y algunas de las posibles aplicaciones directas en la gestión del riesgo. La metodología y las herramientas de CAPRA para el cálculo de riesgo son compatibles con el estándar peruano establecido por la Superintendencia de Banca y Seguros (SBS) para la estimación de pérdidas probables por sismo en edificaciones (CISMID, 2005). El informe “Bases técnicas para la estimación de pérdidas con fines de seguros de terremoto”, desarrollado por el CISMID y publicado en enero de 2005, establece los lineamientos para la evaluación probabilista del riesgo sísmico en carteras de edificaciones en Perú.

Existen a la fecha otras metodologías propuestas y software desarrollado para la evaluación probabilista de riesgos, como HAZUS (Whitman, et al., 1997; FEMA, 2011) OpenQuake (Pinho, 2012; Silva, et al., 2014), SELENA-RISe (Molina, et al., 2010; Lang & Corea, 2010), entre otras. HAZUS ha sido ampliamente utilizado en diferentes tipos de estudios de evaluación de riesgo, no solo sísmico sino también de huracanes e inundaciones (Schneider & Schauer, 2006). Varias de las metodologías desarrolladas y referencias utilizadas por HAZUS son utilizadas y/o adaptadas por las metodologías mencionadas (CAPRA, OpenQuake, SELENA). Como parte de una futura investigación, se sugiere realizar una comparación entre los resultados de la aplicación de las metodologías y software existentes más relevantes.

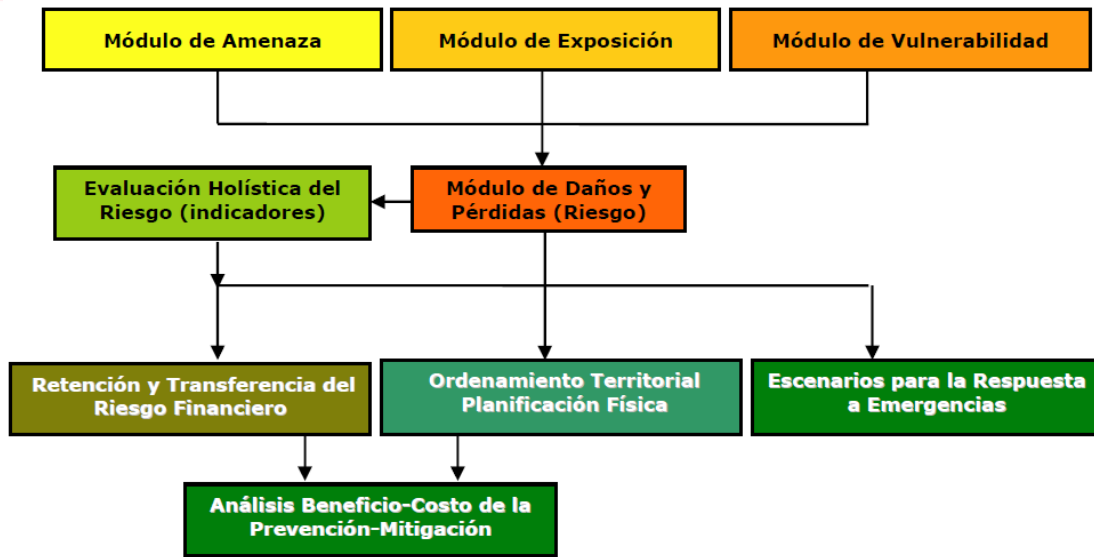


Figura 2.1. Metodología de estimación probabilista del riesgo (ERN-AL, 2010)



3. EVALUACIÓN PROBABILISTA DEL RIESGO SÍSMICO DE HOSPITALES

En este capítulo se muestra el procedimiento seguido para la evaluación del riesgo sísmico de hospitales de Lima Metropolitana utilizando los lineamientos de CAPRA. Se hace una descripción de las etapas de la investigación y de cada componente del riesgo: peligro, exposición y vulnerabilidad.

El componente de peligro fue obtenido del último estudio peligro sísmico realizado por el Instituto Geofísico del Perú (IGP). El componente de exposición fue desarrollado como parte de este trabajo, y se muestra la base de datos generada. La caracterización de la vulnerabilidad fue realizada utilizando métodos aproximados que relacionan la intensidad sísmica y el daño probable. Con base en dichos componentes, se estimó el riesgo sísmico expresado en términos de tres indicadores: Pérdida por Escenario Sísmico (ESL), Pérdida Anual Esperada (PAE) y Pérdida Máxima Probable (PML).

3.1 ETAPAS DE LA INVESTIGACIÓN

Las etapas de la investigación fueron las siguientes (Santa-Cruz, 2013):

- a) Revisión de la información de peligro sísmico. Se recogió la información de amenaza sísmica elaborada por el Instituto Geofísico del Perú (IGP) y la información de microzonificación sísmica de estudios previos realizado por el CISMID y el INDECI.
- b) Definición de funciones de vulnerabilidad de hospitales: A partir de información de estudios previos y visitas al campo, los pabellones de hospitales fueron clasificados de acuerdo a su desempeño esperado ante sismos. Con base en modelos analíticos y empíricos reportados en la literatura técnica se establecieron funciones de vulnerabilidad para cada tipo.

- c) Generación de la base de datos: A partir de visitas e inspecciones técnicas se recopiló información de cada pabellón de los hospitales. A cada pabellón se le asignó un tipo estructural y una función de vulnerabilidad. Se generó una base de datos en formato electrónico. La base de datos fue georreferenciada considerando la información del Ministerio de Salud y la información proporcionada por cada hospital.
- d) Evaluación de riesgo sísmico: La información descrita en los pasos anteriores fue ingresada como capas de información (peligro, exposición y vulnerabilidad) en el programa CAPRA-GIS. Con dicha información se estimaron valores de pérdidas por escenarios, Pérdida Anual Esperada (PAE) y Pérdida Máxima Probable (PML) para la base de datos generada.
- e) Elaboración de un informe y consolidación de las bases de datos y resultados del estudio: Los resultados fueron analizados para definir criterios y recomendaciones en los temas de transferencia de riesgo, planeación para la atención de la emergencia y financiamiento para la reconstrucción post-desastre.

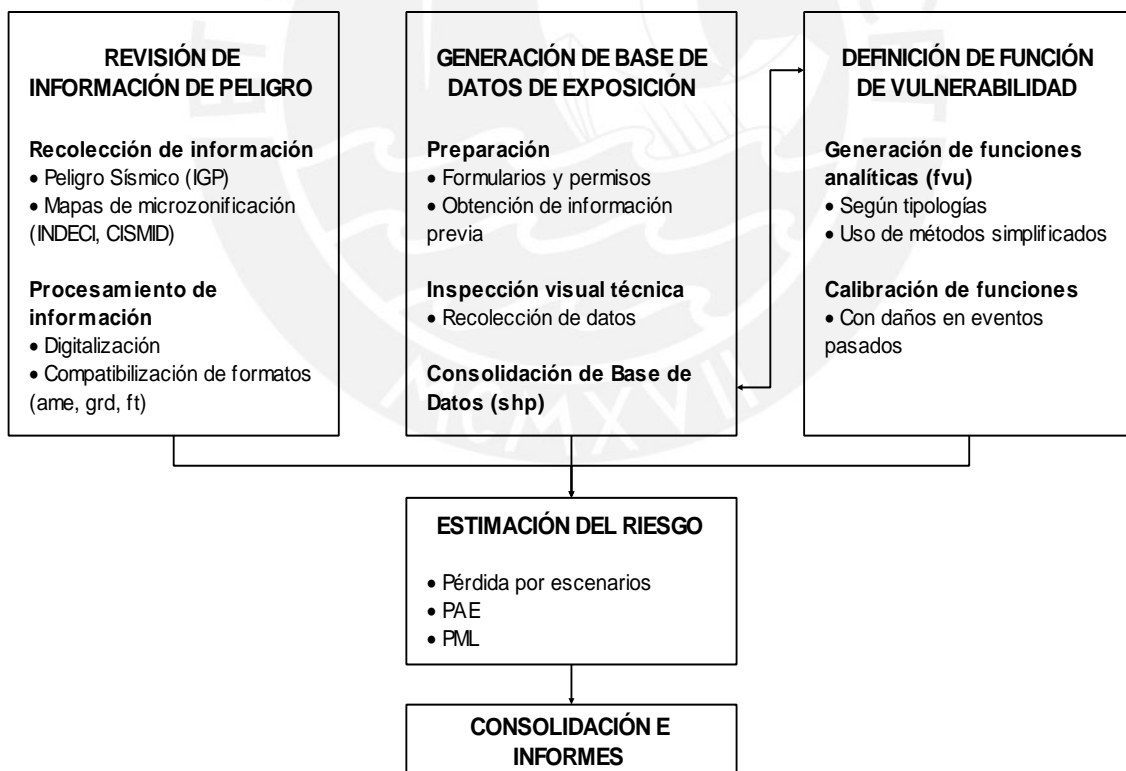


Figura 3.1. Etapas de la investigación (Santa-Cruz, 2013)

A partir de la definición de las etapas se elaboró el cronograma general de actividades, que se muestra en el ANEXO IV.

3.2 ÁMBITO DE ESTUDIO

El área de estudio, Lima Metropolitana, tiene una extensión de 2,812 km² y una población aproximada de 8.5 millones de habitantes distribuidos en 49 distritos (INEI, 2008). Existen a la fecha 47 hospitales e institutos de salud en Lima¹, y más de 200 establecimientos de salud de menor categoría. La distribución de hospitales se muestra en la Figura 3.2. Los hospitales en Lima están administrados por 3 instituciones:

- El Ministerio de Salud (MINSA), que administra 20 hospitales y 7 institutos especializados
- El Seguro Social de Salud (EsSalud), que administra 14 hospitales
- Las Direcciones de Sanidad de la Marina de Guerra, Fuerza Aérea del Perú (FAP), y Policía Nacional de Perú (PNP), que administran 6 hospitales

Existe una concentración importante de establecimientos en el Cercado de Lima, Jesús María, y otros distritos de Lima Centro, como se puede apreciar en la Figura 3.2. Sin embargo, afuera de estas zonas los hospitales son escasos y alejados unos de otros (Lima Norte, Lima Sur y Lima Este).

Para el presente trabajo de investigación se evaluaron un total de 41 hospitales en Lima Metropolitana: 27 hospitales e institutos administrados por MINSA y 14 hospitales administrados por EsSalud (ver Tabla 3.1). No fueron incluidos los hospitales de la Marina de Guerra, FAP y PNP pues son administrados de forma independiente.

3.3 PELIGRO SÍSMICO

En este acápite se describe la evaluación probabilista del peligro sísmico del Perú desarrollada por el IGP como parte del Proyecto de Asistencia Técnica 1 (TAP, por sus siglas en inglés: *Technical Assistance Project*), financiado por el Banco Mundial, en coordinación con el Ministerio de Economía y Finanzas (MEF). La descripción de las actividades llevadas a cabo durante el TAP 1 puede encontrarse en Zeballos (2012). La evaluación de peligro sísmico llevada a cabo por el IGP ha servido como referencia para establecer la nueva zonificación sísmica del Perú. Dicha zonificación está incluida en el Proyecto de la Norma E.30 Diseño Sismorresistente, publicado por SENCICO el año 2014 (SENCICO NTE E.030, 2014).

¹ La nueva sede del Instituto Nacional de Salud del Niño en San Borja y la nueva sede del Instituto Nacional de Rehabilitación en Chorrillos no han sido consideradas, pues no se encontraban totalmente operativas durante el periodo de evaluación técnica de hospitales.

Tabla 3.1. Lista de hospitales evaluados

	N	Nombre	Distrito
Hospitales MINSA	1	H. N. Daniel Alcides Carrion	Bellavista
	2	H. María Auxiliadora	San Juan de Miraflores
	3	H. N. Hipólito Unanue	El Agustino
	4	H. N. Dos De Mayo	Lima
	5	H. N. Arzobispo Loayza	Lima
	6	H. De Emergencias Pediátricas	La Victoria
	7	H. de Emergencias José Casimiro Ulloa	Miraflores
	8	H. Madre Niño San Bartolomé	Lima
	9	H. N. Cayetano Heredia	San Martin de Porres
	10	H. N. Sergio E. Bernales	Comas
	11	H. Víctor Larco Herrera	Magdalena del Mar
	12	H. San José Del Callao	Carmen de La Legua
	13	H. José Agurto Tello De Chosica	Lurigancho - Chosica
	14	H. Hermilio Valdizan	Santa Anita
	15	H. Carlos Lanfranco La Hoz	Puente Piedra
	16	H. De Ventanilla	Ventanilla
	17	H. Vitarte	Ate
	18	H. Huaycan	Ate
	19	H. San Juan De Lurigancho	San Juan de Lurigancho
	20	H. Santa Rosa	Pueblo Libre
Hospitales EsSalud	21	H. N. Alberto Sabogal	Bellavista
	22	H. N. Edgardo Rebagliati	Jesús María
	23	H. N. Guillermo Almenara	La Victoria
	24	H. De Emergencias Grau	La Victoria
	25	H. Luis Negreiros	Callao
	26	H. Marino Molina	Comas
	27	H. Octavio Mongrut	San Miguel
	28	H. De Vitarte	Ate
	29	H. Angamos	Miraflores
	30	H. Aurelio Díaz Ufano	San Juan de Lurigancho
	31	H. Jorge Voto Bernales	Santa Anita
	32	H. San Isidro Labrador	Santa Anita-Ate
	33	H. Carlos Alcántara	La Molina
	34	H. Uldarico Rocca	Villa El Salvador
Institutos MINSA	35	I. N. De Salud Del Niño	Breña
	36	I. N. Materno Perinatal	Lima
	37	I. N. De Rehabilitación	Bellavista
	38	I. N. De Ciencias Neurológicas	Lima
	39	I. N. De Salud Mental HD-HN	San Martin de Porres
	40	I. N. De Oftalmología	Breña
	41	I. N. De Enfermedades Neoplásicas	Surquillo

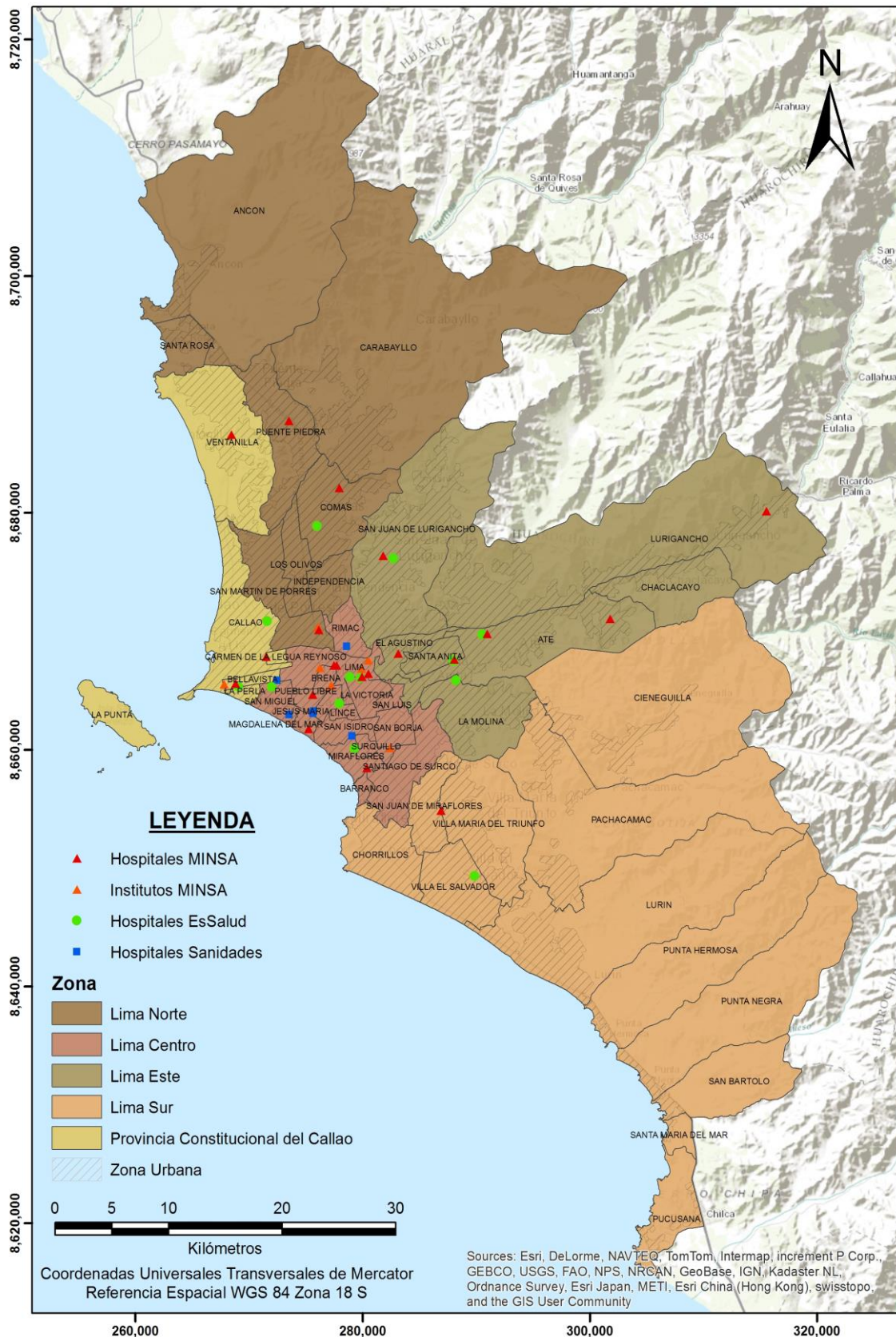


Figura 3.2. Distribución de hospitales en Lima Metropolitana

3.3.1 Tipos de estudio de peligro sísmico

La amenaza o peligro sísmico se define como la frecuencia y severidad de la ocurrencia de sismos en un lugar específico. A la fecha, es posible identificar dos tipos de metodologías para la estimación del peligro sísmico: el análisis determinístico y el análisis probabilístico (Kramer, 1996).

- a) El análisis determinístico toma en cuenta el escenario o evento sísmico de mayor magnitud o los eventos más relevantes que pueden ocurrir en un lugar específico, según el historial sísmico registrado en el lugar. En este tipo de análisis no se consideran las incertidumbres en las magnitudes y ubicación del sismo. Tampoco considera el nivel del movimiento sísmico que puede tener una estructura durante su vida útil, por lo cual no resulta apropiado para tomar decisiones.
- b) El análisis probabilístico toma en cuenta todos los posibles eventos que puedan afectar la zona de estudio, considerando la probabilidad de ocurrencia de cada evento y el grado de incertidumbre de las variables involucradas. La incertidumbre es tomada en cuenta en términos de la variabilidad esperada de los parámetros utilizados y los coeficientes de variación respectivos.

3.3.2 Análisis probabilístico del peligro sísmico

Debido a que el enfoque probabilista considera la aleatoriedad e incertidumbre de los sismos, y permite una mejor representación de la naturaleza de los mismos, fue adoptado por el IGP como metodología general para el cálculo de peligro sísmico. El procedimiento general para realizar el Análisis Probabilista de Peligro Sísmico (PSHA, por sus siglas en inglés) fue propuesto por Esteva (1967) - Cornell (1968), y fue resumido en cuatro pasos por Reiter (1990) (ver Figura 3.3):

- a) Identificación y caracterización de fuentes sísmicas
- b) Caracterización de la distribución temporal de recurrencia de sismos
- c) Definición de las ecuaciones de predicción de movimiento del suelo (GMPE)
- d) Cálculo de la probabilidad de excedencia del parámetro utilizado para medir el movimiento sísmico durante un determinado periodo de tiempo

3.3.3 Información sismotectónica y fuentes sísmicas

Una fuente sísmica puede ser representada por un punto, o también una línea, área o volumen geográfico que tiene características geológicas, geofísicas y sismológicas

similares (ver Figura 3.4). Se puede considerar que la ocurrencia y generación de eventos en una fuente sísmica es espacial y temporalmente homogénea (Kramer, 1996). Para las fuentes tipo punto, se asume que toda la sismicidad está concentrada en la coordenada XYZ asignada a la fuente. Sin embargo, en los otros tipos de fuente se debe hacer una corrección que tome en cuenta la distribución homogénea de la sismicidad en toda la fuente.

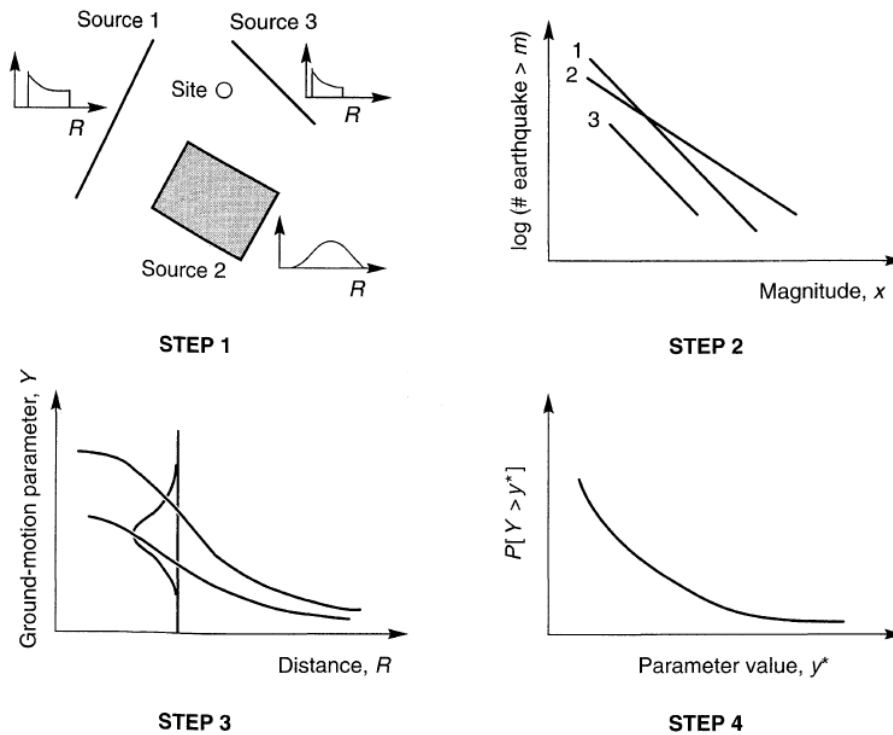


Figura 3.3. Los cuatro pasos de un PSHA (Kramer, 1996)

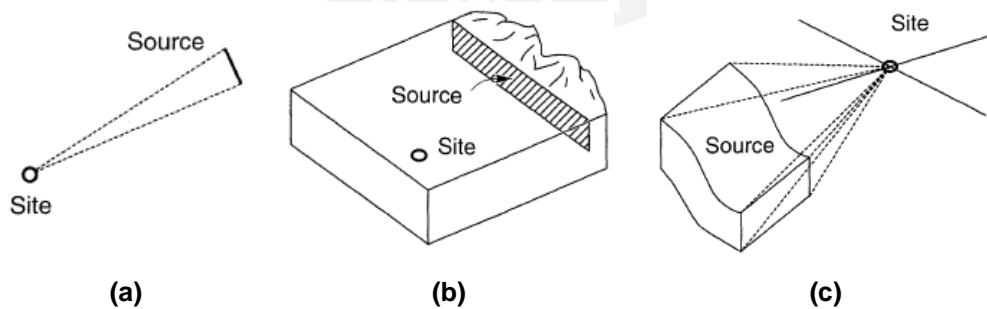


Figura 3.4. Ejemplos de distintas geometrías de fuentes sísmicas: a) fuente puntual, b) fuente lineal, c) fuente tridimensional (Kramer, 1996)

Por ejemplo, para las fuentes tipo área se debe realizar una división de las fuentes en triángulos por un procedimiento llamado triangulación recursiva (Ordaz, 1999). Se asume que en el centro de gravedad de cada triángulo (llamado subfuente) se

concentra la sismicidad proporcional al área del mismo. Esta subdivisión se realiza recursivamente hasta alcanzar un tamaño de triángulo suficientemente pequeño como para garantizar la precisión del cálculo del peligro sísmico, explicado en el acápite 3.3.6. El programa utilizado por el IGP, CRISIS2207 ver. 7.4 (Ordaz, et al., 2007) realiza la triangulación recursiva de las fuentes de manera automática, y genera subfuentes de acuerdo al tamaño mínimo de triángulo ingresado por el usuario.

Para la definición de las fuentes, el IGP consolidó y actualizó la información existente sobre sismicidad histórica en el Perú al año 2011; y realizó estudios de evaluación de las fuentes asociadas a diferentes mecanismos de generación de sismos. Con ello lograron caracterizar y definir geoméricamente 33 fuentes sísmicas que afectan al territorio peruano. Dichas fuentes están modeladas con superficies planas, inclinadas, con profundidades que varían desde 30 hasta 200 km. La geometría en planta de las fuentes se muestra en la Figura 3.5. Las fuentes de subducción modelan la interacción de las placas Sudamericana y de Nasca, mientras que las fuentes continentales están relacionadas con la actividad sísmica superficial andina (Tavera & Buforn, 2001).

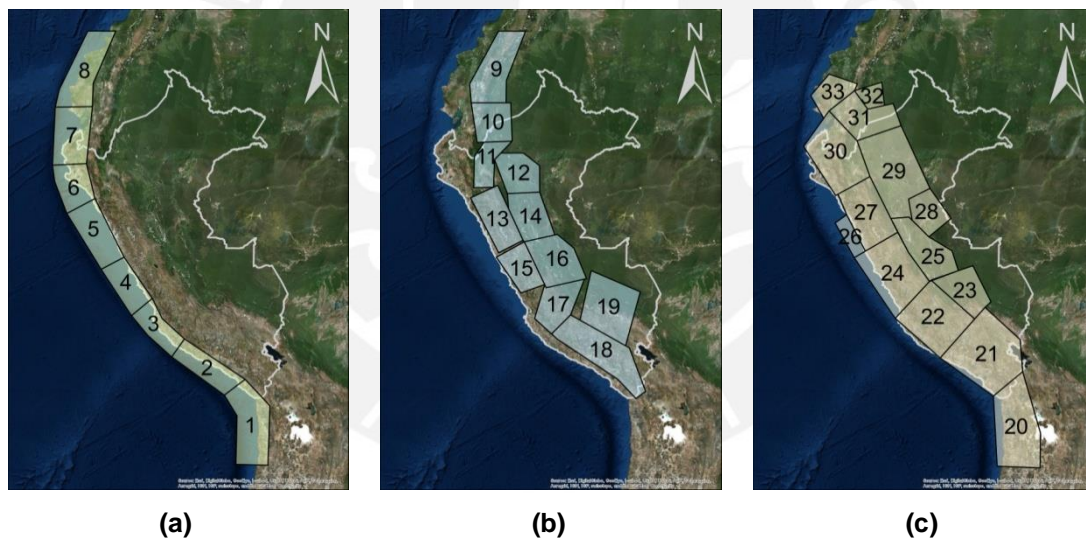


Figura 3.5. Fuentes sísmicas propuestas por el IGP: (a) subducción superficial, (b) fallas superficiales, (c) subducción profunda (Santa-Cruz, 2013)

3.3.4 Recurrencia sísmica

La sismicidad de una fuente se establece a partir de la relación entre la frecuencia y la magnitud de los eventos que se generan en la fuente. Esta relación puede ser expresada con una ecuación de recurrencia de magnitudes de la fuente sísmica, que indica cual es la tasa de excedencia de una magnitud sísmica en particular durante un periodo de tiempo. Para caracterizar la recurrencia de magnitudes de las fuentes

sísmicas en el territorio peruano, el IGP propone utilizar el modelo de Gutenberg y Richter modificado (Lomnitz-Adler & Lomnitz, 1979) (Ecuación (3.1)).

$$\lambda(M) = \lambda_0 \frac{e^{-\beta M} - e^{-\beta M_u}}{e^{-\beta M_0} - e^{-\beta M_u}} \tag{3.1}$$

Donde M_0 es la mínima magnitud relevante (magnitud de momento). Los otros parámetros son propios de cada fuente sísmica: M_u es la magnitud máxima que puede generarse en cada fuente, λ_0 es la tasa de recurrencia de sismos de cada fuente (con magnitud mayor a la mínima especificada) y β es un parámetro sismológico que se determina mediante análisis de regresión con datos de la región en estudio. De esta manera, cada una de las fuentes queda caracterizada mediante una serie de parámetros de sismicidad, determinados en base a la información sísmica disponible.

El programa utilizado, CRISIS2007 subdivide o discretiza el rango de magnitudes (desde M_0 hasta M_u) de acuerdo al número de magnitudes requeridas por el usuario. De esta manera, para cada fuente sísmica definida existirá un número determinado de subfuentes y magnitudes. Un escenario sísmico estará definido por su fuente, subfuente y magnitud (Figura 3.6). A partir del número de fuentes (N), subfuentes (P) y magnitudes (Q), se puede establecer el número de escenarios que tendrá el mapa de amenaza que se exportará a CAPRA-GIS para el cálculo de riesgo sísmico (Ecuación (3.2)). El mapa exportado por el IGP tiene más de 30 mil escenarios sísmicos.

$$\text{Número de Escenarios Sísmicos} = N \times P \times Q \tag{3.2}$$

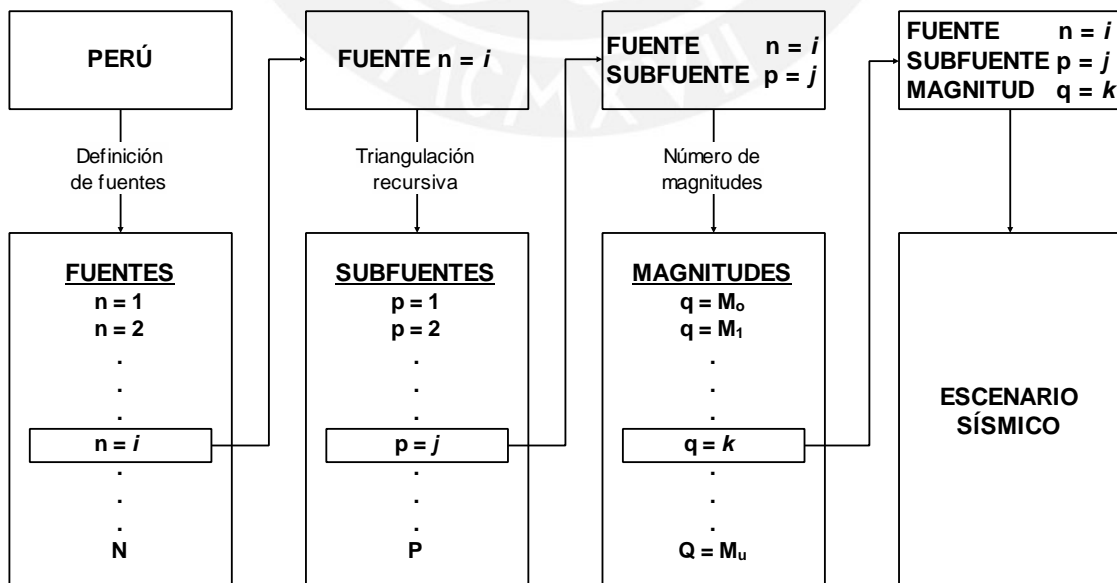


Figura 3.6. Definición de escenario sísmico

3.3.5 Predicción del movimiento del suelo

Una vez determinada la tasa de actividad de las fuentes sísmicas, es necesario evaluar los efectos que, en términos de intensidad sísmica, produce cada fuente en un sitio de interés. Para ello se requiere saber qué intensidad se presentaría en el sitio en cuestión (en terreno firme) si en la íesima fuente ocurriera un sismo con una magnitud dada. La estimación de los parámetros que definen la intensidad de un sismo se hace por medio de Ecuaciones de Predicción de Movimiento del Suelo (GMPE, por sus siglas en inglés), también conocidas como leyes de atenuación. Estas dependen de la distancia de la fuente sísmica al lugar de interés, la magnitud sísmica, y el tipo de mecanismo focal de ruptura. A medida que se cuenta con mayor cantidad de registros de sismos, es posible refinar las GMPE.

El IGP realizó diversos análisis y estudios específicos para el ajuste de las GMPE existentes, tomando como referencia ecuaciones propuestas en la literatura que se adecuaron a la zona de estudio (Youngs, et al. (1997) para las fuentes de subducción (Ecuación (3.3)); Sadigh, et al. (1997) para las fuentes continentales (Ecuación (3.4)), entre otras). Se utilizaron GMPE espectrales, que toman en cuenta el hecho de que la atenuación de las ondas generadas por el movimiento sísmico varía según el periodo de vibración. Con ello, es posible calcular el espectro de respuesta (ordenadas espectrales para diferentes periodos de vibración), dadas una magnitud y una distancia. Utilizando CRISIS 2007 fue posible analizar e introducir una GMPE híbrida construida a través de una serie de GMPE estándares, cada una con un peso distinto asignado. Para el cálculo del peligro sísmico, el IGP empleó más de 300 registros para evaluar el ajuste de estas ecuaciones.

$$\ln(Sa) = C_1 + C_2M + C_3(10 - M)^3 + C_4 \ln(R + C_6 \exp(C_7M)) + C_5H + C_7Z_T \quad (3.3)$$

$$\ln(Sa) = C_1 + C_2M + C_3(8.5 - M)^{2.5} + C_4 \ln(R + \exp(C_5 + C_6M)) + C_7 \ln(R + 2) \quad (3.4)$$

Las ecuaciones (3.3) y (3.4) muestran dos GMPE utilizadas por el IGP: Youngs, et al. (1997) y Sadigh, et al. (1997), respectivamente. En las ecuaciones, M es la magnitud momento del sismo, R es la distancia de la fuente al sitio de interés, y los parámetros C_i son valores hallados para cada tipo de fuente (estos dependen de la zona, la magnitud y el periodo de vibración que se desea evaluar). De esa manera, las GMPE permitieron obtener la intensidad en términos de la Aceleración Máxima del Terreno (PGA, por sus siglas en inglés) y pseudoaceleración espectral (Sa). La PGA es el valor máximo absoluto de la aceleración del movimiento sísmico y la Sa se relaciona con las

fuerzas laterales de inercia que se generan en las estructuras durante sismos. Los valores de S_a dependen del periodo fundamental de vibración estructural y del amortiguamiento estructural.

La Tabla 3.2 muestra las pseudoaceleraciones (S_a) generadas por los escenarios de la Fuente N° 4 - Subfuente N° 45. Dentro de la subfuente N° 45, existen seis magnitudes consideradas (M_w), que van desde 5.29 hasta 8.21 grados (del escenario 2671 al 2676). Los periodos considerados para el cálculo de la pseudoaceleración van desde un valor cercano a cero (0.005s) hasta 3 segundos, con intervalos de 0.1 segundos. Esta subdivisión origina 31 ordenadas espectrales, denominadas “intensidades” por el programa CAPRA-GIS (31 intensidades). Se considera que el epicentro de cada escenario está ubicado en el centroide de la subfuente. Luego, para calcular la pseudoaceleración en un punto específico (por ejemplo, en el centro de Lima), se utilizan las GMPE descritas, dependiendo de las características de la fuente.

Tabla 3.2. Pseudoaceleraciones en el centro de Lima, a 50 km del epicentro

Fuente N° 4 - Subfuente N° 45							
Magnitud M_w :		$M_w=5.29$	$M_w=5.88$	$M_w=6.46$	$M_w=7.04$	$M_w=7.63$	$M_w=8.21$
Escenario N°:		2671	2672	2673	2674	2675	2676
Intensidad	T (s)	Pseudoaceleración (gal) (en el centro de Lima)					
1	0.005	34.5	56.7	87.0	123.8	165.0	207.6
2	0.1	57.4	97.1	151.6	217.4	289.5	361.0
3	0.2	54.1	98.2	163.0	246.3	343.6	446.6
.
.
.
29	2.8	1.9	4.4	9.1	16.6	27.5	41.7
30	2.9	1.6	4.9	8.1	14.9	24.8	37.6
31	3.0	1.4	3.4	7.1	13.2	22.0	33.6

La Figura 3.7 muestra las gráficas generadas con base en la información de la Tabla 3.2. Esta información es exportada por CRISIS2007 para los diferentes escenarios sísmicos y periodos estructurales definidos. Se puede observar que el pico de aceleraciones ocurre en 0.2 segundos de periodo estructural, considerando que la vibración sucede en suelo firme. Se debe tener en cuenta que, a menor distancia de los intervalos de las intensidades, mayor será la precisión del espectro generado. En el ANEXO XIII se muestra el formato de las funciones de vulnerabilidad para tomar en cuenta el periodo estructural y la S_a correspondiente según la tipología estructural definida.

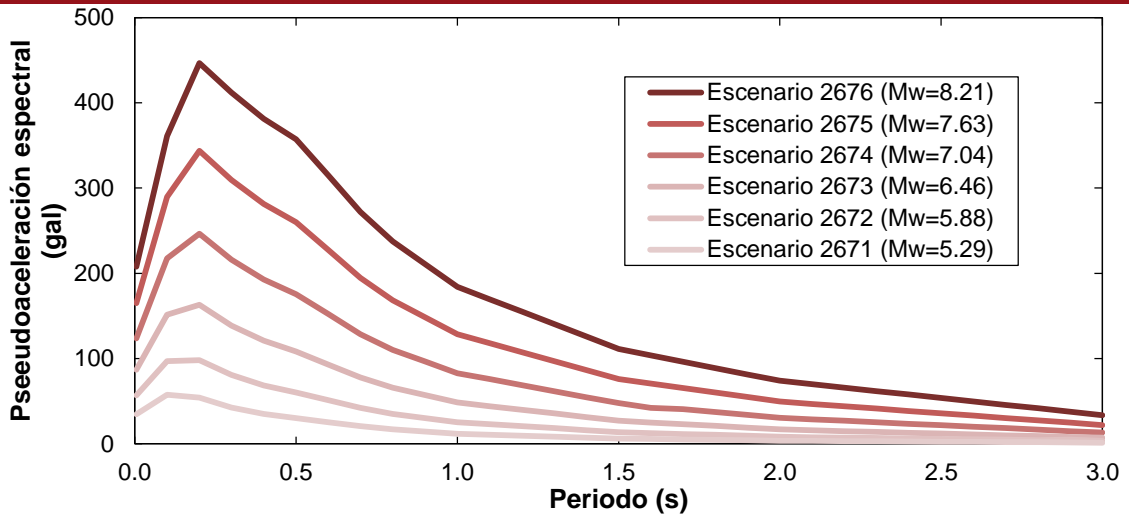


Figura 3.7. Ordenadas espectrales para sismos de diferente magnitud en el centro de Lima, con epicentro a 50 km de distancia

El mapa de la Figura 3.8 muestra la intensidad sísmica esperada (mapa de isosistas) en suelo firme (PGA), para un sismo $M_w=8.21$ ocurrido a 50 km del centro de Lima (Escenario N° 2676 en la capa de peligro sísmico del IGP). Se puede observar que las intensidades pueden presentar variaciones significativas, dependiendo de la extensión del ámbito de estudio. Por lo tanto, el análisis de escenarios sísmicos en grandes ciudades debe tomar en cuenta la variación de las intensidades de acuerdo al tamaño del área en estudio. En el Capítulo 4 se muestran los resultados de riesgo para este escenario.

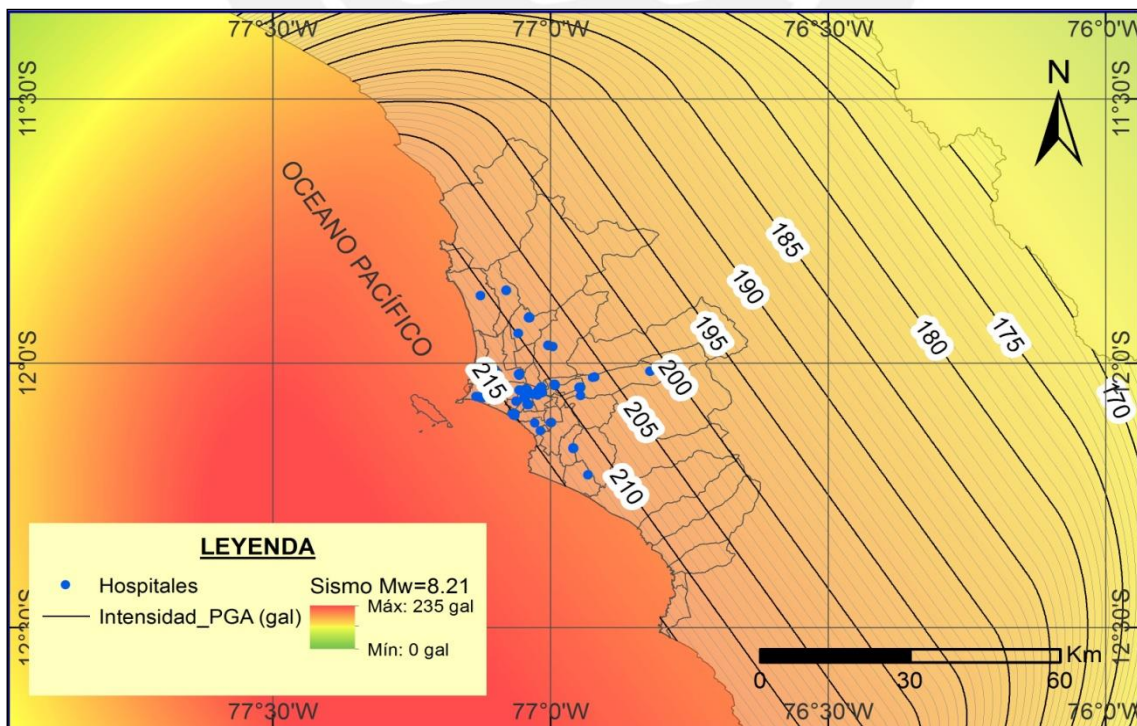


Figura 3.8. Mapa de isosistas para sismo de $M_w=8.21$ a 50 km del centro de Lima

Debido a la naturaleza impredecible de los sismos, la aceleración no debe ser considerada como una variable determinista, sino como una variable aleatoria. Por lo tanto, se le consideró asociada a una cierta incertidumbre, una distribución de probabilidades lognormal (con mediana dada por la GMPE correspondiente) y una desviación estándar típica del logaritmo natural de la aceleración. Este tipo de distribución de probabilidades (lognormal) es adecuada para variables que son a su vez producto de otros factores, como es el caso de la aceleración (definida según la magnitud momento del escenario (M), la distancia de la fuente al sitio de interés (R), y otros factores) (Ordaz, et al., 2000).

3.3.6 Cálculo del peligro sísmico

El peligro sísmico fue calculado considerando la sismicidad de las fuentes y las GMPE asociadas a cada tipo de fuente. El peligro, expresado en términos de la tasa de excedencia de intensidades $\nu(a)$, puede ser estimado considerando la suma de los efectos de la totalidad de las fuentes sísmicas y la distancia entre cada fuente y el sitio donde se encuentra la estructura. La tasa de excedencia de intensidades fue calculada utilizando la Ecuación (3.5) (Cornell, 1968).

$$\nu(a) = \sum_{n=1}^N \int_{M_0}^{M_u} \frac{d\lambda(M)}{dM} Pr(A > a | M, R_i) dM \quad (3.5)$$

En dicha ecuación la sumatoria abarca la totalidad de las fuentes sísmicas N , y $Pr(A > a | M, R_i)$ es la probabilidad de que la intensidad exceda un cierto valor, dadas la magnitud del sismo M , y la distancia entre la i -ésima fuente y el sitio R_i . La función $\lambda_i(M)$ es la tasa de actividad de las fuentes sísmicas. La integral se realiza desde M_0 hasta M_u , lo que indica que se toma en cuenta, para cada fuente sísmica, la contribución de todas las magnitudes (Cornell, 1968). El programa CRISIS2007 realiza una integración espacial de todas las subfuentes de cada fuente, y para todas las magnitudes, según lo ingresado por el usuario (ver Figura 3.6). La Figura 3.9 muestra la tasa de excedencia de aceleraciones máximas del suelo para el centro de Lima, y el espectro de peligro uniforme generado para un periodo de retorno de 500 años.

Dado que se ha definido que la intensidad tiene una distribución lognormal, para una determinada magnitud y distancia, la probabilidad $Pr(A > a | M, R_i)$ se calcula con la Ecuación (3.6). En dicha ecuación $\phi(\cdot)$ es la distribución normal estándar, $E(\ln a | M, R_i)$ el valor esperado del logaritmo de la intensidad (calculado con la GMPE correspondiente) y $\sigma_{\ln a}$ la desviación estándar del logaritmo de la intensidad. De esta

manera, el peligro sísmico queda expresado en términos de la tasa de excedencia para valores dados de intensidad sísmica $v(a)$, que en este caso corresponde al valor de las ordenadas del espectro de respuesta de pseudoaceleraciones para 5% de amortiguamiento crítico y el periodo fundamental de vibración de la edificación de interés, T .

$$Pr(A > a | M, R_i) = \phi \left(\frac{E(\ln a | M, R_i) - \ln a}{\sigma_{\ln a}} \right) \quad (3.6)$$



Figura 3.9. Tasa de excedencia de intensidades y espectro de peligro uniforme para el centro de la Ciudad de Lima calculados con el programa CRISIS2007 (Santa-Cruz, 2013)

El programa CRISIS2007 tiene la opción de exportar la capa de peligro sísmico generada en formato AME, que puede ser ingresado al programa CAPRA-GIS para el subsiguiente cálculo de pérdidas probables. El archivo exportado (*.ame) contiene los escenarios de peligro sísmico generados por el programa (Figura 3.6), con información de la frecuencia de ocurrencia y la intensidad que origina cada escenario sobre la zona de estudio definida por el usuario. El AME puede ser de dos tipos: a) AME normal, que contiene la información de cada escenario y una malla de puntos con los diferentes valores de intensidad anteriormente definidos, y b) archivo paramétrico, que contiene los parámetros de cada escenario que hacen posible el cálculo de las intensidades en el punto de interés dentro del programa CAPRA-GIS.

3.3.7 Modificación de parámetros de peligro por efectos de sitio

Durante un sismo, el comportamiento dinámico del suelo dependerá de las condiciones sísmicas, geológicas, geomorfológicas y geotécnicas de la zona en

estudio. En determinadas zonas podrá producirse una modificación de los parámetros de peligro sísmico debido a la influencia de las condiciones locales de sitio. Los efectos que producen las condiciones locales del suelo en un determinado lugar son conocidos como efectos de sitio (INDECI-PNUD, 2010).

Los efectos de sitio en Lima han sido evaluados a partir de estudios de microvibración ambiental y utilizando el método de Nakamura (CISMID, 2005). De esta manera se ha determinado periodos de vibración del terreno para todos los distritos de la ciudad de Lima, y se ha elaborado el mapa de microzonificación de Lima Metropolitana (ver Figura 3.11). Se tomó como referencia las consideraciones dadas por la Norma de Diseño Sismorresistente (RNE NTE E.030, 2003) y las características mecánicas y dinámicas de los suelos en base a las investigaciones hechas por el CISMID (2005) y el IGP (INDECI-PNUD, 2010) (ver Tabla 3.3).

El comportamiento dinámico de cada tipo de suelo puede ser modelado mediante funciones de amplificación espectrales. Las funciones de amplificación permiten conocer el valor de amplificación por el cual se deben modificar las aceleraciones espectrales calculadas a nivel de terreno firme. Estas funciones se pueden construir para diferentes valores de aceleración máxima del terreno, con el fin de tener en cuenta el efecto no lineal de degradación de los suelos (ver Figura 3.10).

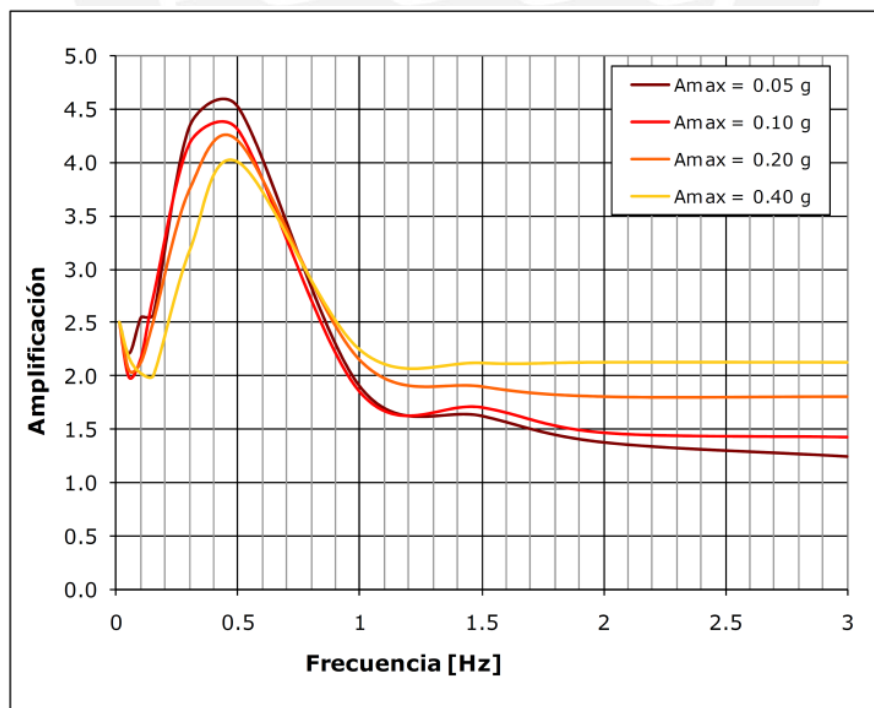


Figura 3.10. Ejemplo de función de amplificación típica para suelos blandos (ERN-AL, 2010)

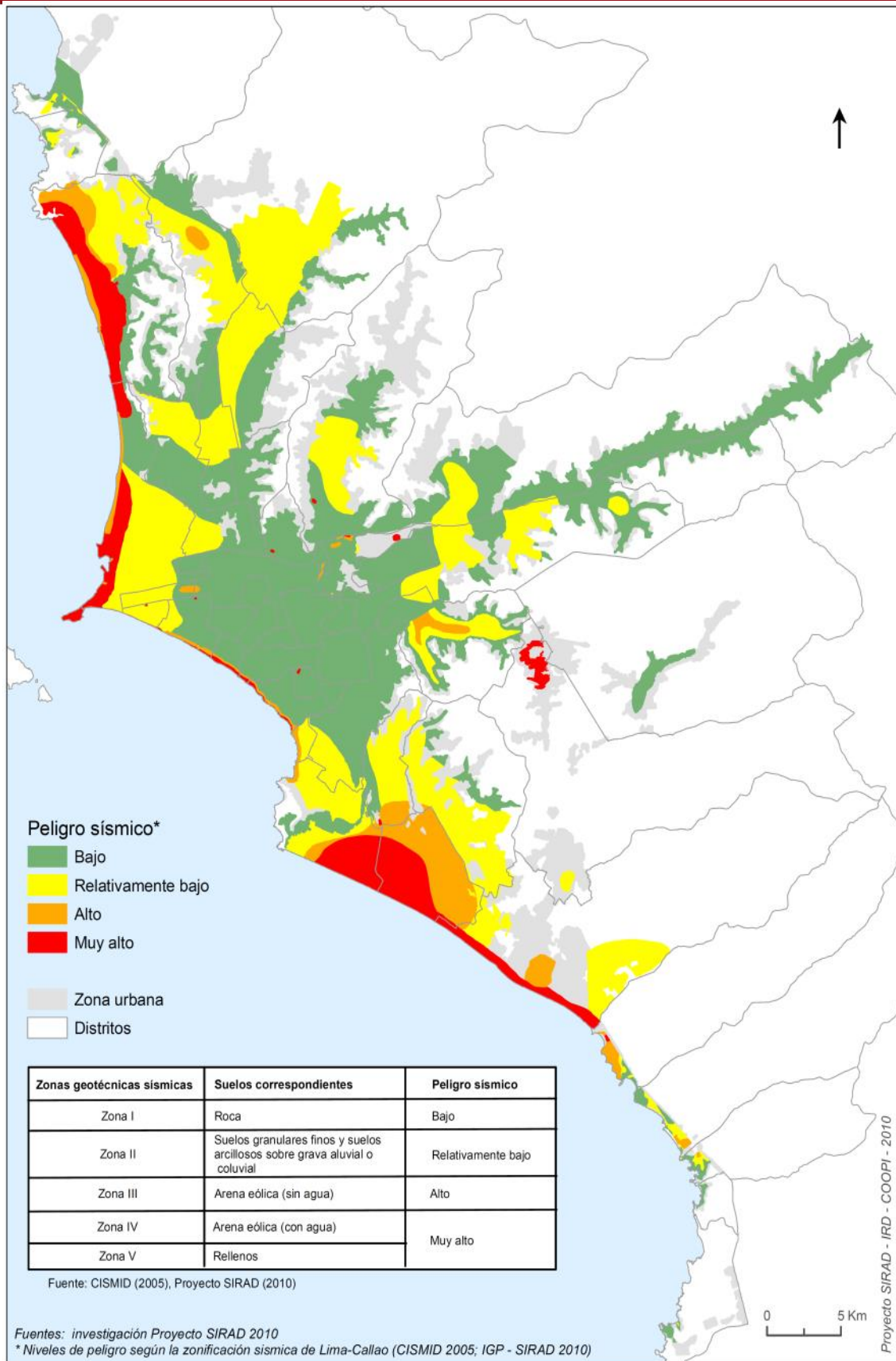


Figura 3.11. Mapa de microzonificación de Lima Metropolitana. (INDECI-PNUD, 2010)

A partir de la función de amplificación definida para el sitio de análisis, las aceleraciones espectrales a nivel de superficie Sa_{sup} , se pueden calcular mediante la Ecuación (3.7) (ERN-AL, 2010). En dicha ecuación, $A_{A\ max}$ es el nivel de amplificación calculado para un valor de $A\ max$ dado (aceleración máxima del terreno firme), y Sa_{tf} es la aceleración espectral calculada a nivel del terreno firme, empleando el modelo de amenaza sísmica descrito anteriormente.

$$Sa_{sup} = A_{A\ max} Sa_{tf} \tag{3.7}$$

El área de estudio, Lima Metropolitana, aún no cuenta con los datos suficientes para desarrollar las funciones de amplificación espectrales que permitan modelar el comportamiento dinámico de cada tipo de suelo. Por lo tanto, la influencia del tipo de suelo es tomada en cuenta de manera aproximada. La Norma E.030 (2003), toma en cuenta la amplificación de las aceleraciones por medio de los factores S y C (factor de amplificación por tipo de suelo y amplificación sísmica según el periodo estructural, respectivamente) (ver Tabla 3.3).

Tabla 3.3. Parámetros del suelo (según RNE NTE E.030, 2003) y zonificación del suelo (según INDECI-PNUD, 2010)

Zonas (INDECI- PNUD, 2010)	Parámetros del suelo (RNE NTE E.030, 2003)			
	Tipo	Descripción	Tp (s)	S
ZONA I	S1	Roca o suelos muy rígidos	0.4	1
ZONA II	S2	Suelos intermedios	0.6	1.2
ZONA III	S3	Suelos flexibles o con estratos de gran espesor	0.9	1.4
ZONA IV	S4	Condiciones excepcionales	(*)	(*)
ZONA V	-	Rellenos sanitarios	-	-

(*) Los valores de Tp y S para este caso serán establecidos por el especialista, pero en ningún caso serán menores que los especificados para el perfil tipo S3 (RNE NTE E.030, 2003).

En la Tabla 3.3, el factor S indica la amplificación de la aceleración en terreno firme por efectos del tipo de suelo, de manera similar al factor $A_{A\ max}$ de la Ecuación (3.7). El factor C se puede interpretar como el factor de amplificación de la respuesta estructural respecto de la aceleración del suelo. El factor C se calcula con la Ecuación (3.8) (RNE NTE E.030, 2003). En dicha ecuación, el parámetro T_p indica de manera aproximada el periodo hasta el cual un determinado tipo de suelo amplificará las solicitaciones sísmicas sobre una estructura de un periodo determinado. Este

coeficiente (C) se interpreta como el factor de amplificación de la respuesta estructural respecto de la aceleración en el suelo.

$$C = 2.5 \left(\frac{T_p}{T} \right); C \leq 2.5 \quad (3.8)$$

En el presente trabajo de investigación se crearon funciones de amplificación lineales para cada tipo de suelo, tomado como factor de amplificación el parámetro S . Las funciones se asumieron lineales a lo largo del espectro, es decir con el mismo valor de amplificación S para todas las ordenadas espectrales definidas por cada intensidad (ver Tabla 3.2). A partir del mapa de microzonificación de Lima Metropolitana y el factor de amplificación S se realizó la generación de una malla de puntos de acuerdo al tipo de suelo. Dicha malla (grid) indica, para cada punto definido, el factor de amplificación que modificará las pseudoaceleraciones del archivo AME (exportado previamente con el programa CRISIS2007) (Huerta, et al., 2011). Se utilizó el programa Efectos de Sitio v1.0 (ERN-AL, 2010), que permite enlazar cada punto de la malla con las características del tipo de suelo y funciones de amplificación para cada intensidad definida en el archivo AME. La resolución de la malla es definida por el usuario, y a mayor resolución habrá mayor precisión en el cálculo de las intensidades.

3.4 EXPOSICIÓN

La exposición se refiere a los componentes de infraestructura o a la población expuesta susceptible a sufrir daño o afectación por los peligros considerados, en este caso sismos. Para realizar la caracterización de la exposición es necesario identificar las variables de los bienes expuestos: características geométricas, físicas e ingenieriles principales, valoración económica y el nivel de ocupación humana que puede llegar a tener el sistema (Lavell, 2003). Esta información puede ser obtenida a partir de una recolección de datos en campo (inspección visual técnica) u otros métodos aproximados para obtención de la información (indicadores, valores experto, u otros). Una vez recopilada la información, debe ser consolidada en una base de datos y georreferenciada en formato GIS (ERN-AL, 2010).

En este acápite se describe el procedimiento seguido para la recolección de datos de campo por medio de inspecciones visuales y la creación de una base de datos en GIS. También se describe el formato necesario de la base de datos para su posterior uso en CAPRA-GIS. A partir de la información recolectada se definieron tipologías estructurales y se estimó el costo aproximado reposición. El procedimiento seguido para generar funciones de vulnerabilidad se describe en el acápite 3.5.

3.4.1 Nivel de resolución del modelo de exposición

Según la información asignada, los modelos de elementos expuestos (modelos de exposición) pueden ser de 3 niveles (ERN-AL, 2010):

- Modelo nivel 1: modelo más básico, basado totalmente en indicadores generales que dependen principalmente de la distribución socioeconómica de la población.
- Modelo nivel 2: modelo intermedio, basado en información local ajustada, mapas publicados, fotografías aéreas (Google Earth o similares) e información procesada disponible.
- Modelo nivel 3: modelo basado en información detallada de la infraestructura expuesta (por ejemplo base de datos catastral de una ciudad) que incluya todas las características relevantes. Depende del tipo y calidad de información disponible y puede complementarse con la información disponible en los modelos de los niveles 1 y 2 según se requiera.

El modelo de exposición desarrollado en este trabajo fue de nivel 3. La recolección de datos se realizó mediante visitas de inspección en campo y se completó la información necesaria con la ayuda de imágenes satelitales, fotografías aéreas y recopilación de información otorgada por cada hospital. La información recolectada permitió caracterizar a cada pabellón de los hospitales evaluados. La Figura 3.12 muestra la distribución del número de pabellones de hospitales en Lima Metropolitana. Se pudo encontrar que existen en promedio 18 pabellones por hospital

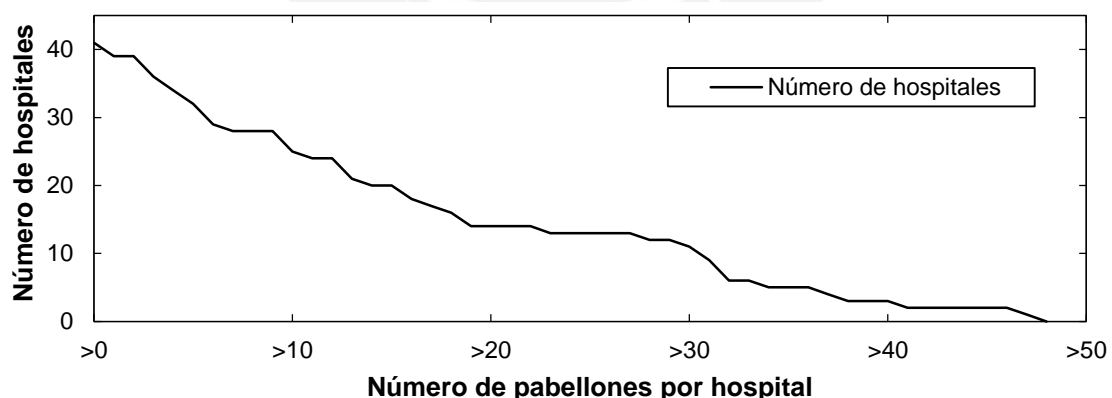


Figura 3.12. Distribución del número de pabellones por hospital en Lima Metropolitana

3.4.2 Definición de variables relevantes

La recolección de información para la generación de bases de datos incluyó diversas variables relevantes, teniendo en cuenta aquellas que describan la vulnerabilidad

sísmica de las estructuras. La definición de las variables incluidas se realizó a partir de la revisión de estudios previos realizados en hospitales a nivel nacional (Lazares & Rios, 1996; OPS, 1997; Reque, 2006; INDECI-PNUD, 2010; PREDES, 2011) y otras metodologías propuestas (ATC, 2002; NSET, 2004; CENAPRED, 2006; OPS, 2008) descritas en los acápites 2.1 y 2.3. Se pueden identificar cinco grupos de información, que se describen en la Tabla 3.4. La descripción de las variables, sus unidades y modalidades se muestra en el ANEXO V.

Tabla 3.4. Grupos de información en base de datos de exposición

Grupo	Descripción
I Información del hospital	Información básica del pabellón, como el nombre del hospital al que pertenece, nomenclatura del pabellón, institución a la que pertenece, descripción del pabellón y nomenclatura del mismo
II Características generales	Características generales del pabellón como año de construcción, número de pisos, área construida, entre otras
III Sistema estructural e irregularidades	Información acerca del sistema estructural, costo de reposición e irregularidades estructurales en planta y en elevación
IV Defectos estructurales, constructivos y daños	Información de defectos estructurales y constructivos como columna corta, fisuras, deflexiones excesivas, entre otras
V Otros	Información de la calidad de acabados y otras observaciones de la evaluación

3.4.3 Instrumento de recolección de datos

A partir de las variables relevantes identificadas, se elaboró un formulario que sirvió como instrumento de recolección de datos de campo. Se desarrollaron dos formatos equivalentes: físico y digital. El formulario en formato físico se muestra en el ANEXO VIII. El formato elegido para la recolección de datos fue digital, pues requiere menor tiempo de posprocesamiento de la información recolectada (no se tiene que digitalizar la información pues los datos se llenan en la base de datos directamente, ver Figura 3.14). Otras ventajas y desventajas de ambos formatos se muestran en la Tabla 3.5. Cabe señalar que el INEI llevó a cabo el año 2013, por encargo del MINEDU, el Censo de Infraestructura Educativa a nivel nacional, y también utilizó dispositivos digitales (*tablets*) para el llenado de los formularios correspondientes (INEI, 2014).

Tabla 3.5. Ventajas y desventajas de tipos de instrumento de recolección de datos

Formato	Ventajas	Desventajas
Físico	<ul style="list-style-type: none"> - Facilidad de llenado - No se necesita dispositivo electrónico - Requiere capacitación mínima - Facilidad de control de la información recolectada - Menor susceptibilidad a robo del evaluador 	<ul style="list-style-type: none"> - Requiere impresión de información complementaria (croquis de hospitales u otro) - Requiere mayor trabajo de pos procesamiento (digitalización de la información) - La toma de fotografías y georreferenciación debe ser hecha con otros dispositivos
Digital	<ul style="list-style-type: none"> - No requiere impresión de fichas ni material complementario - Rápido procesamiento de información (no requiere digitalización) - La recolección de datos, toma de fotografías y georreferenciación se realiza con un mismo dispositivo 	<ul style="list-style-type: none"> - Mayor dificultad de llenado - Necesidad de un dispositivo electrónico (<i>smartphone</i> o similar) - Se requiere previa capacitación para uso del dispositivo electrónico - Susceptibilidad a robo

3.4.4 Tareas previas a la recolección de datos de campo

Previo a la recolección de datos de campo fue necesario obtener los permisos y credenciales correspondientes (ver ANEXO VI). Los permisos permitieron realizar la visita a los hospitales, recolectar los datos necesarios y tomar fotografías de cada pabellón de los hospitales. Por otro lado, se solicitó información de infraestructura a la Oficina Ejecutiva de Administración, la Oficina Ejecutiva de Planeamiento Estratégico o la Oficina de Servicios Generales de cada hospital. La información obtenida incluyó planos de arquitectura, distribución o croquis de los hospitales (ver ANEXO VII). Esta información permitió definir la nomenclatura de cada pabellón y elaborar un recorrido de inspección previo a la visita de campo. La Figura 3.13 muestra un croquis típico de hospital y la nomenclatura definida. Los pabellones adyacentes (separados por una junta sísmica indicada en los planos obtenidos) fueron considerados independientes debido a su comportamiento durante sismos.

La información obtenida permitió realizar las visitas a campo con mayor rapidez, pues en algunos casos gran parte del formulario podía ser llenado con los datos proporcionados. El área de los pabellones y su correspondiente georreferenciación fueron posibles utilizando la información proporcionada previamente. En algunos casos la información proporcionada también incluía el número de pisos, antigüedad de cada pabellón, uso del pabellón, entre otros parámetros relevantes. En el caso de los hospitales que no contaban con la información requerida, se completó la información con fotografías aéreas que permitieran identificar su distribución. La información

previamente procesada fue cargada a los dispositivos móviles para poder ser revisada antes y durante la evaluación.



Figura 3.13. Ejemplo de nomenclatura de pabellones: (a) pabellones del Hospital Daniel Alcides Carrión y (b) definición de nomenclatura (en letras rojas)

3.4.5 Recolección de datos de campo

Utilizando el instrumento de recolección descrito en el acápite 3.4.3 y la información proporcionada descrita en el acápite 3.4.4, se llevó a cabo la recolección de datos de hospitales. El reconocimiento de sistemas y características estructurales de cada pabellón se realizó mediante una Inspección Visual Rápida (*Rapid Visual Screening*) descrita en el reporte FEMA 154 (ATC, 2002) (ver acápite 2.2.2). Los datos fueron recolectados en dispositivos electrónicos que permitieron además tomar fotografías y georreferenciar los pabellones evaluados (ver Figura 3.14). Se utilizaron aplicaciones existentes para la visualización de la información en los dispositivos utilizados. Las fotografías tomadas de cada pabellón de los hospitales se muestran en el ANEXO XII. Estas también sirvieron para controlar la calidad de los datos recolectados durante el trabajo de campo.

En promedio, cada pabellón fue evaluado en 25 minutos, se evaluó un hospital al día y la recolección de datos de campo tuvo una duración total de 10 semanas, considerando un solo evaluador. El proceso de recolección de datos se realizó en paralelo con la solicitud de información de planos e información de cada hospital (ver el cronograma de actividades en el ANEXO IV). Al finalizar el proceso de recolección

de datos se realizó una revisión general de la información obtenida y se elaboró una base de datos preliminar para poder definir tipologías de hospitales.



Figura 3.14. Recolección de datos de campo utilizando dispositivos electrónicos: (a) georeferenciación, (b) base de datos, (c) fotografía del hospital, (d) entorno multitarea

3.4.6 Caracterización de tipologías estructurales

Con base en los datos recolectados en campo y estudios previos descritos se pudieron definir seis tipologías o tipos estructurales básicos. Cada tipología puede variar según su año de construcción, número de pisos e irregularidades estructurales. La descripción de las variaciones se muestra en la Tabla 3.6. El resumen de tipologías y sus variaciones se muestra en la Tabla 3.7. Se asume que los pabellones construidos antes del año 1997 fueron diseñados con normas sismorresistentes inadecuadas, y los construidos después de 1997 fueron diseñados con la norma de dicho año (RNE NTE E.030, 1997) o posterior (RNE NTE E.030, 2003; SENCICO NTE E.030, 2016). Se ha

podido verificar que los edificios diseñados con la norma del año 1997 o posterior tienen un buen desempeño en sismos moderados y severos (Muñoz, et al., 2004; Pique & Salinas, 2008).

Tabla 3.6. Descripción de variables de las tipologías

Descripción	Abreviación	Observación
Año de construcción	<1997	PRE Diseño y construcción anterior al código E.030 1997
	>1997	POST Diseño y construcción a partir del código E.030 1997
Rango de número de pisos	Bajo	B 1-3 pisos (típico: 2 pisos)
	Medio	M 4-7 pisos (típico: 5 pisos)
	Alto	A >8 pisos (típico: 12 pisos)
Tipo de irregularidad	En planta	IP Esquinas entrantes, discontinuidades en el diafragma, sistemas resistentes no paralelos
	En altura	IA Piso blando, discontinuidad vertical, irregularidad geométrica

Tabla 3.7. Tipologías de hospitales de Lima Metropolitana

Tipología estructural	Abreviación	Año de construcción (Código de diseño)	Número de pisos	Irregularidad
Pórticos de concreto armado	PORT			
Muros y pórticos de concreto armado	DUAL	POST/PRE	B-M-A	IP/IA
Mampostería confinada	MC			
Mampostería histórica / no reforzada	MH	-	1	IP
Prefabricados	PREF	-	1	IP
Nave industrial	NI	POST/PRE	1	IP

La descripción de las tipologías básicas se muestra en el ANEXO IX. La combinación de las seis tipologías básicas con las variables de año de construcción y número de pisos dan como resultado veintiséis subtipologías, sin incluir la variable de irregularidad estructural (en planta y/o en altura). La elaboración de funciones de vulnerabilidad de cada una de las tipologías definidas, con sus respectivas variaciones, se describe en el acápite 3.5. Luego, a cada pabellón se le asignará una función de vulnerabilidad según sus características estructurales.

3.4.7 Valoración económica de hospitales

Con base en los expedientes técnicos (ET) de tres hospitales de Ica se estimó el costo de reposición por metro cuadrado de área construida (ver Tabla 3.8). El costo de reposición indica el valor de la edificación nueva que reemplazará a aquella que no cumpla con el código sismorresistente adecuado (ver acápite 3.4.6). Los ET obtenidos fueron otorgados por el MINSA, y corresponden a edificaciones diseñadas con códigos permitidos (POST). Dichos hospitales fueron proyectados como reemplazo de los existentes que sufrieron daño en el sismo de Pisco del año 2007 (Rios & Zavala, 2008; San Bartolomé & Quiun, 2008; Zavala & Estrada, 2008). Se tomó en cuenta las partidas de arquitectura, estructuras e instalaciones eléctricas y sanitarias. Se asume que los componentes de las partidas de arquitectura e instalaciones eléctricas y sanitarias sufrirán el mismo daño que los componentes de la partida de estructuras durante sismos (Bruneau & Reinhorn, 2007). No se consideran otras partidas como instalaciones mecánicas y equipos.

Tabla 3.8. Costo de reposición por metro cuadrado de área construida de hospitales

Hospital:	Hospital Regional de Ica	Hospital Santa María del Socorro de Ica	Hospital San Juan de Dios de Pisco	Promedio	
Elaboración ET:	Nov-09	Nov-09	Nov-09		
Especialidad	Costo por m ² (S/.)				
Arquitectura	889.64	653.26	869.51	804.14	40%
Estructuras	658.39	580.88	598.76	612.67	30%
Instalaciones eléctricas y sanitarias	492.53	640.83	643.64	592.33	30%
Costo Directo	2,040.55	1,874.97	2,111.91	2,009.14	100%

El costo de reposición promedio por metro cuadrado considerado es de S/. 2,010.00. No se considera dentro del costo los gastos generales, utilidad, IGV u otros costos indirectos, pues son variables y pueden ser estimados a partir del costo directo. Con el costo de reposición estimado se calcula el Valor Físico (VALFIS) de cada pabellón de la base de datos, considerando el área construida previamente calculada. La información de VALFIS de cada pabellón es necesaria para poder utilizar CAPRA-GIS, como se verá en el acápite siguiente.

3.4.8 Consolidación de base de datos de exposición

La información recolectada de cada pabellón (geometría, variables de los grupos de información, caracterización de tipología estructural y valoración económica) debe unirse y consolidarse en una base de datos. Esta debe ser compatible con el formato utilizado por el programa CAPRA-GIS, agregando los campos de datos (variables) obligatorios mostrados en el ANEXO X. Las variables relevantes identificadas anteriormente, que sirvieron para caracterizar las tipologías estructurales, estarán incluidas como campos en la base de datos final (son opcionales). La consolidación de la base de datos se realizó utilizando el programa ArcGIS v10.2 (ESRI, 2013), que posee herramientas para la georreferenciación y manejo de los datos antes de ser ingresados al programa CAPRA-GIS. Cada fila contiene información de cada pabellón de los hospitales (incluyendo los campos obligatorios) y su respectiva geometría debidamente georreferenciada. Las características generales de la base de datos se muestran en la Tabla 3.9, y los metadatos (características globales de la base de datos) se muestran en el ANEXO X. La base de datos final (en formato Shapefile) se muestra en digital, en el ANEXO XI.

Tabla 3.9. Características generales de la base de datos

Característica	Descripción
Número de caracteres de campo permitidos	Hasta diez caracteres alfanuméricos (sin espacios, se permite subguión)
Tipo de campo	Texto/Numérico
Número de objetos	737
Tipo de objetos	Polígono
Sistema coordenado	Geográfico
Datum	GCS_WGS_1984
Unidades angulares	Grados sexagesimales

3.5 VULNERABILIDAD

La vulnerabilidad se define como la predisposición o susceptibilidad de un sistema a sufrir daño ante la ocurrencia de un peligro. El sistema en análisis puede ser de infraestructura (vulnerabilidad estructural), social o grupo humano (vulnerabilidad humana) u otro tipo de sistema. La vulnerabilidad depende de las características del sistema, por ejemplo en un edificio dependerá de su diseño, calidad de materiales y técnica de construcción (Kuroiwa, 2004). La vulnerabilidad se puede expresar en términos de una función de vulnerabilidad, que relaciona la intensidad de un evento (del peligro analizado) con la fracción de daño esperado por la ocurrencia de dicho

evento (Ordaz & Santa-Cruz, 2003). Otra manera de representar la vulnerabilidad es a través de una función de fragilidad, que relaciona la intensidad de un evento con la probabilidad de excedencia de daño debido a la ocurrencia de dicho evento (Singhal & Kiremidjian, 1996). En el ANEXO XIII se describe la relación entre las funciones de fragilidad y vulnerabilidad (Yamin, et al., 2014).

Tanto las funciones de vulnerabilidad como las de fragilidad pueden ser modeladas siguiendo diferentes enfoques, según la información disponible y los objetivos de la investigación. Los modelos pueden ser los siguientes (Rossetto & Elnashai, 2003; Calvi, et al., 2006):

- a) Modelos empíricos, basados en observaciones del comportamiento de componentes o estructuras durante eventos de intensidad conocida o estimada. Algunas metodologías propuestas y funciones desarrolladas siguiendo este enfoque son las siguientes: Yamaguchi & Yamazaki, 2000; Rossetto & Elnashai, 2003; Kuroiwa, 2004; Colombi, et al., 2008; Rota, et al., 2008; Jaiswal, et al., 2011; Karababa, 2011; Liel & Lynch, 2012.
- b) Modelos analíticos, desarrollados con base en información teórica o experimental del comportamiento estructural de edificios. Algunas metodologías propuestas para la generación de este tipo de modelos son las siguientes: Singhal & Kiremidjian, 1996; Miranda, 1996; Masi, 2003; Crowley, et al., 2004; Rossetto & Elnashai, 2005; Borzi, et al., 2008; Bal, et al., 2008; FEMA, 2011; D'Ayala & Kishali, 2012; Silva, et al., 2014; Yamin, et al., 2014.
- c) Modelos basados en opinión de expertos, desarrollados cuando no se dispone de modelos analíticos ni empíricos. La metodología más utilizada para desarrollar este tipo de modelos es la propuesta por el reporte ATC-13 (ATC, 1985) y ha sido empleada y/o adaptada por diversos autores (McCormack & Rad, 1997; Rojahn, et al., 1997; Lagomarsino & Giovinazzi, 2006; Muñoz, et al., 2007).

Dentro de esta clasificación, se puede mencionar que los modelos analíticos (por ejemplo, Rossetto & Elnashai, 2003) son comúnmente comparados y calibrados con modelos empíricos (Rossetto & Elnashai, 2005). También existen modelos denominados híbridos, que se construyen utilizando datos empíricos y la información faltante es completada a partir de modelos analíticos (Barbat, et al., 1996; Kappos, 1998). Para mayor información acerca de funciones de fragilidad y/o vulnerabilidad, se pueden consultar los manuales técnicos de HAZUS (FEMA, 2011), GEM (Rossetto, et al., 2013; Rossetto, et al., 2014; D'ayala, et al., 2014) y el EERI (D'Ayala, et al., 2012).

En este acápite se describe el procedimiento seguido para la generación de funciones de vulnerabilidad de las tipologías estructurales definidas anteriormente (Tabla 3.7) utilizando modelos analíticos con base en información teórica. La metodología utilizada es la propuesta por Miranda (1996) y adaptada por Ordaz, et al. (2000), descrita en la metodología CAPRA. Los parámetros estructurales de las tipologías de hospitales definidas son tomados de las tipologías equivalentes mostradas en HAZUS (FEMA, 2011). Las demandas inelásticas son estimadas con los factores de Miranda (1997; 1999), los factores modificadores por irregularidades estructurales son adaptados del reporte ASCE 7-05 (ASCE, 2006), y la desviación estándar asignada es la propuesta por Ordaz, et al. (2000).

Todos los valores descritos en este acápite y utilizados para el cálculo de las funciones de vulnerabilidad de cada tipología se muestran en el ANEXO XIII. La equivalencia de tipologías tomadas de HAZUS y otras referencias se muestra en la Tabla 3.10. Para el caso de la función de vulnerabilidad de adobe, se utilizan las curvas de fragilidad analíticas desarrolladas por Tarque, et al. (2012) para viviendas de adobe (ANEXO XIII). El formato utilizado para la digitalización de las funciones de vulnerabilidad se muestra en el ANEXO XIII.

Tabla 3.10. Equivalencia de tipologías y características estructurales utilizadas

Grupo	Abreviación	Descripción	Equivalencia	Fuente
Tipología estructural	PORT	Pórticos de concreto armado	C1	HAZUS
	DUAL	Muros y pórticos de concreto armado	C2	HAZUS
	MC	Mampostería confinada	RM2	HAZUS
	MH	Mampostería histórica	A_TARQUE	Tarque, 2012
	PREF	Prefabricados	MH	HAZUS
	NI	Nave Industrial	S3	HAZUS
Año de const.	PRE	<1997	MC	HAZUS
	POST	>1997	HC	HAZUS
Rango De pisos	B	Bajo	L	HAZUS
	M	Medio	M	HAZUS
	A	Alto	H	HAZUS
Irreg.	IP	En planta	-	ASCE 7-05, NTE 0.30
	IA	En altura	-	ASCE 7-05, NTE 0.30

3.5.1 Funciones de vulnerabilidad

Las funciones de vulnerabilidad son curvas que relacionan el valor de pérdida o daño (físico o humano) con una medida de intensidad del peligro analizado (ver Figura

3.15). En este estudio, se desarrollan funciones de vulnerabilidad física para las tipologías estructurales definidas. La pérdida o daño (L) se define como una variable aleatoria, definida por su media y su desviación estándar, y la función de vulnerabilidad describe la variación de L para los diferentes valores de intensidad. El parámetro de daño utilizado es la Relación Media de Daño (MDR , por sus siglas en inglés), que corresponde la relación entre el valor de reparación y el valor de reposición del inmueble. El parámetro de intensidad del peligro sísmico utilizado es la aceleración espectral, que es compatible con el obtenido en el modelo de peligro sísmico (ver acápite 3.3).

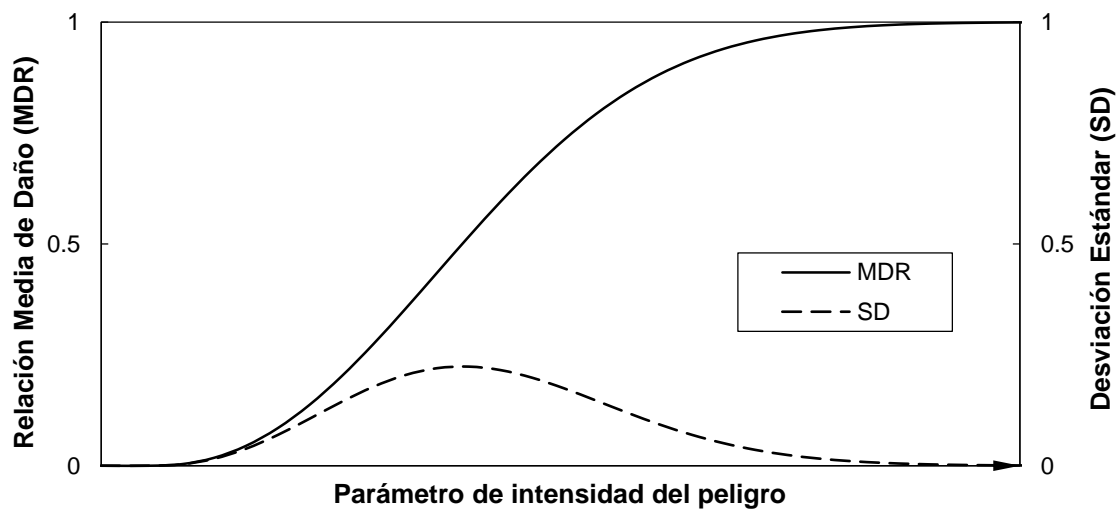


Figura 3.15. Representación típica de una función de vulnerabilidad

La expresión utilizada para determinar las funciones de vulnerabilidad es la propuesta por Miranda (1996) y adaptada por Ordaz, et al. (2000), descrita en la metodología CAPRA (Ecuación (3.9)).

$$E(L|\gamma_i) = 1 - 0.5^\theta; \theta = \left(\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}\right)^\rho \tag{3.9}$$

Donde L es la pérdida bruta, γ es la distorsión máxima de entrepiso de la estructura, $\bar{\gamma}$ es la distorsión máxima de entrepiso asociada a una pérdida del 50% de valor total del inmueble y ρ es un parámetro de vulnerabilidad que define la curvatura de la función y es del orden de 2. $E(L|\gamma_i)$ es el valor esperado de pérdida para una distorsión determinada, y su valor varía entre cero y uno. Tanto $\bar{\gamma}$ como ρ dependen de las características estructurales de cada tipología. El parámetro $\bar{\gamma}$ de cada tipología se puede estimar a partir de la sectorización del espectro de capacidad y la definición de

niveles de daño (acápites 3.5.2 y 3.5.3). La distorsión máxima de entrepiso de cada tipología, γ , se estima a partir de la aceleración espectral (acápite 3.5.4).

3.5.2 Curvas de capacidad y espectros de capacidad

La metodología utilizada en este acápite es la descrita en HAZUS (FEMA/NIBS, 1999; FEMA, 2011), y mencionada en la metodología CAPRA. La curva de capacidad de un edificio expresa la relación entre el desplazamiento en el techo de una estructura y la cortante basal asociada. Sirve para estudiar el comportamiento elástico e inelástico de un edificio ante cargas sísmicas horizontales. Es posible modificar esta curva para expresarla en función del desplazamiento espectral (S_d) y la aceleración espectral (S_a), utilizando las Ecuaciones (3.10) y (3.11) (ver Figura 3.16). Estas ecuaciones permiten obtener el espectro de capacidad de un edificio de varios pisos o de Múltiples Grados De Libertad (MDOF, por sus siglas en inglés), y transformar el sistema a Un Grado De Libertad (SDOF, por sus siglas en inglés).

$$S_a = \frac{V}{\alpha_1}; \alpha_1 = \frac{L^{*2}}{M^*} = \frac{(\sum m_i \phi_i)^2}{\sum m_i \phi_i^2} \tag{3.10}$$

$$S_d = \Delta \cdot \alpha_2; \alpha_2 = \frac{1}{\Gamma}; \Gamma = \frac{L^*}{M^*} = \frac{\sum m_i \phi_i}{\sum m_i \phi_i^2} \tag{3.11}$$

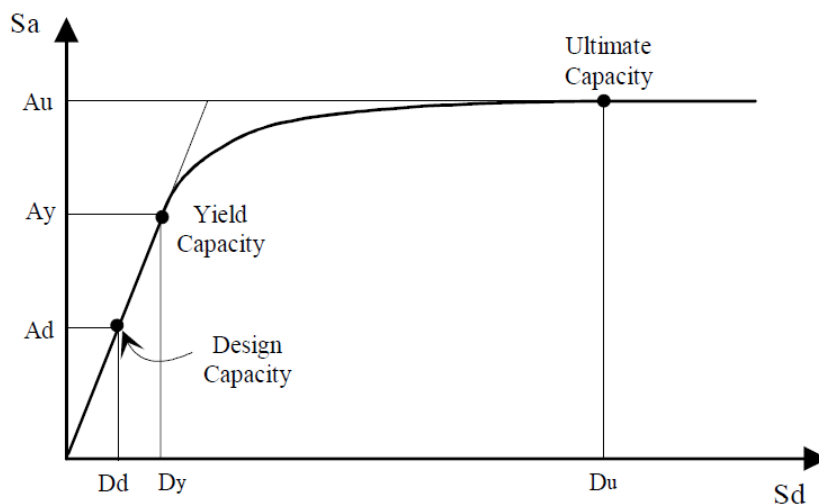


Figura 3.16. Ejemplo de curva de capacidad de un edificio (FEMA, 2011)

Donde V es la cortante basal, Δ es el desplazamiento del edificio en el techo, α_1 es la masa efectiva del primer modo de vibración, Γ es el factor de participación modal y α_2 es la fracción de la altura total en el punto de observación del desplazamiento. Los términos m_i y ϕ_i corresponden a la masa total y desplazamiento en cada uno de los niveles del edificio para el primer modo de vibración. Si el edificio puede ser modelado

como un sistema SDOF, solo será necesario dividir Sa entre la masa M del edificio para obtener el espectro de capacidad.

Para la generación de los espectros de capacidad en este trabajo, se calcularon los pares de valores (D_y, A_y) y (D_u, A_u) (Punto de fluencia (*Yield Capacity*) y Punto de comportamiento último (*Ultimate Capacity*), respectivamente) (Figura 3.16). Estos valores se calculan a partir de las Ecuaciones (3.12) y (3.13) (FEMA, 2011).

$$A_y = Sa_y = \frac{C_s \gamma}{\alpha_1}; D_y = Sd_y = \frac{Sa_y}{(2\pi/T)^2} \quad (3.12)$$

$$A_u = Sa_u = Sa_y \lambda; D_u = Sd_u = (\lambda \mu) Sd_y \quad (3.13)$$

Donde C_s es el coeficiente de diseño sísmico (fracción del peso del edificio), T es el periodo estructural elástico, γ es la relación entre el esfuerzo de fluencia y el de diseño; λ es la relación entre el esfuerzo último y el de fluencia y μ es la ductilidad (relación entre el desplazamiento último y " λ " veces el desplazamiento de fluencia). Estos valores fueron tomados de las tablas 5.4, 5.5 y 5.6 del manual técnico de HAZUS (FEMA, 2011), para cada tipología estructural equivalente (ver Tabla 3.10).

3.5.3 Niveles de daño

Para poder obtener el valor $\bar{\gamma}$ (distorsión máxima de entrepiso asociada a una pérdida del 50% de valor total del inmueble), es necesario sectorizar la curva de capacidad generado para cada tipología y definir niveles de daño. Se utilizan los valores propuestos por la metodología CAPRA (ERN-AL, 2010):

- a) Punto de fluencia (*Yield Capacity*): daño nulo (0%)
- b) Punto de comportamiento último (*Ultimate Capacity*): *daño total* (100%)

Utilizando estos puntos, es posible estimar la distorsión máxima asociada al 50% de daño ($\bar{\gamma}$), interpolando en la curva de capacidad de cada tipología. Para poder obtener la curva de capacidad es necesario transformar el espectro de capacidad calculado anteriormente a una curva de capacidad (es decir, pasar de SDOF a MDOF). Para ello se utilizan las Ecuaciones (3.10) y (3.11).

3.5.4 Estimación de la demanda inelástica

La demanda inelástica (en este caso, la distorsión máxima de entrepiso, γ) es calculada utilizando la metodología propuesta por Miranda (1997; 1999). Esta permite

determinar el valor de distorsión máxima de entrepiso (γ) a partir de la aceleración espectral (S_a), utilizando la Ecuación (3.14). En el ANEXO XIII se muestra una descripción resumida de esta metodología.

$$\gamma = \frac{\beta_1 \beta_2 \beta_3 \beta_4 T^2}{4\pi^2 H} S_a \quad (3.14)$$

Donde T es el periodo fundamental de la estructura, H es la altura del edificio, y los factores β son los siguientes:

- β_1 es la relación entre el máximo desplazamiento lateral en la azotea de la estructura (MDOF) y el desplazamiento espectral (SDOF), considerando un modelo de comportamiento elástico lineal. Este factor depende del tipo estructural y del número de pisos de la estructura.
- β_2 es la relación entre la máxima distorsión de entrepiso y la distorsión global de la estructura (máximo desplazamiento lateral en la azotea dividido entre la altura total).
- β_3 es la relación entre el máximo desplazamiento lateral del modelo inelástico y el desplazamiento máximo del modelo elástico. Este factor depende de la ductilidad y el periodo estructural
- β_4 es la relación entre los factores β_2 elástico e inelástico. Este factor depende del número de pisos y del nivel de deformación inelástica de la estructura, que se mide en términos de la ductilidad.

Con el cálculo de γ , es posible estimar el daño esperado para diferentes valores de intensidad (S_a). Reemplazando γ (Ecuación (3.14)) en la Ecuación el daño esperado puede quedar en función de S_a con la (Ecuación (3.15)).

$$E(L|S_a) = 1 - 0.5^\theta; \theta = \left[\frac{\left(\frac{\beta_1 \beta_2 \beta_3 \beta_4 T^2}{4\pi^2 H} S_a \right)^p}{\bar{\gamma}} \right] \quad (3.15)$$

De esta manera, es posible calcular el daño esperado $E(L|S_a)$ para cada valor de S_a , y construir las funciones de vulnerabilidad de cada tipología. El valor de la intensidad S_a se obtiene directamente a partir del archivo de peligro AME (acápite 3.3).

3.5.5 Modificación por irregularidades estructurales

Es posible incrementar la vulnerabilidad de las funciones calculadas tomando en cuenta a la presencia de irregularidades en planta (IP) y en altura (IA) (Tabla 3.6). Las

irregularidades y factores considerados son aquellos descritos en el reporte ASCE/SEI 7-05 (ASCE, 2006), y adaptados en el Proyecto de Norma de Diseño Sismorresistente del Perú (SENCICO NTE E.030, 2014). Solo se consideran las irregularidades que pueden ser evaluadas a partir de una inspección visual técnica. Para considerar el incremento de la vulnerabilidad en las funciones de vulnerabilidad, el valor de S_a es planteado como $S_a * \Phi$. Los factores Φ se muestran en la Tabla 3.11.

Tabla 3.11. Factores de modificación por irregularidad estructural

Tipo de irregularidad	Abreviación	Descripción	Factor Φ
En planta	IP	Esquinas entrantes, discontinuidades en el diafragma, sistemas resistentes no paralelos	0.9
En altura	IA	Piso blando, discontinuidad vertical, irregularidad geométrica	0.9
En planta y altura	IP_IA	El factor considerado es el producto de los factores IP*IA	0.81

3.5.6 Desviación estándar del daño

Para fijar la varianza de la pérdida L (y por lo tanto, la desviación estándar de ésta), se utiliza la distribución de probabilidad mostrada en el reporte ATC-13 (ATC, 1985) (Ecuación (3.16)). Se utilizan los parámetros propuestos por CAPRA (ERN-AL, 2010) para el cálculo de las Ecuaciones (3.16) y (3.17). Dichos parámetros fueron obtenidos a partir de ejercicios de simulación donde se suponen estructuras simples con propiedades aleatorias.

$$SD^2(L|S_a) = Q[E(L|S_a)]^{r-1}[1 - E(L|S_a)]^{s-1} \tag{3.16}$$

$$Q = \frac{SD_{max}^2}{L_0^{r-1}(1 - L_0)^{s-1}}; s = \frac{r - 1}{L_0} - r + 2 \tag{3.17}$$

Donde $SD^2(L|S_a)$ es la varianza de la pérdida L dada una intensidad S_a , SD_{max}^2 es la varianza máxima, L_0 es el valor de pérdida para el cual ocurre dicha varianza máxima (SD_{max}^2), y r es un parámetro que define la forma y curvatura de la varianza. Los valores recomendados por CAPRA son: $SD_{max}^2 = 0.05$, $L_0 = 50\%$ y $r = 3$.

3.6 ESTIMACIÓN DEL RIESGO

A partir de los modelos de amenaza, exposición y vulnerabilidad desarrollados, es posible estimar el riesgo sísmico de hospitales. Para fines de este trabajo, el riesgo sísmico se expresa en términos de pérdidas económicas probables, y se calculan tres indicadores: Pérdida por escenario, PAE y PML. En este acápite se muestra el procedimiento de cálculo de estos tres indicadores de riesgo siguiendo los lineamientos de la metodología CAPRA. El tutorial y manual de usuario del software CAPRA-GIS (ERN-AL, 2012) para el cálculo de estos indicadores puede ser descargado de la página web de CAPRA: www.ecapra.org. Las formulaciones utilizadas son obtenidas de Ordaz, et al., 2000; Ordaz & Santa-Cruz, 2003; FEMA, 2008; ERN-AL, 2010 y Santa-Cruz, 2015.

3.6.1 Pérdida por escenario

La Pérdida Esperado por Escenario (ESL, por sus siglas en inglés) es el valor esperado de la pérdida en la edificación j debido a la ocurrencia del i -ésimo escenario probable. Cada escenario está definido por una magnitud y la ubicación de su foco (acápite 3.3). El valor esperado $ESL_{j,i}$ se puede calcular mediante el teorema de la probabilidad total (Ecuación (3.18)).

$$ESL_{j,i} = \sum_I V_j(I) Pr_{i,j}(I) \quad (3.18)$$

Donde, V_j es la función de vulnerabilidad de la edificación j y $Pr_{i,j}(I)$ es la probabilidad de que la intensidad, en la ubicación j en un escenario i sea I . La probabilidad depende de las incertidumbres en las ecuaciones GMEP (acápite 3.3). A partir de este valor se puede hallar la Pérdida Total por Escenario (TESL, por sus siglas en inglés), que se muestra en la Ecuación (3.19).

$$TESL_i = \sum_{j=1}^{Nb} ESL_{j,i} \quad (3.19)$$

Donde Nb es el número total de edificaciones que conforman la cartera (grupo de edificaciones, en este caso hospitales).

3.6.2 Pérdida anual esperada (PAE)

Representa el monto anualizado de las pérdidas por daños en la edificación j debido a todos los sismos probables en un periodo de observación muy largo. Se estima con la Ecuación (3.20).

$$EAL_j = \sum_{i=1}^{N_s} (Pr_i(\text{ocurrencia})ESL_{j,i}) \quad (3.20)$$

donde N_s es el número de escenarios que afectan a la cartera y $Pr_i(\text{ocurrencia})$ es la probabilidad anual de ocurrencia del i -ésimo escenario. La probabilidad se puede estimar de manera discreta: sea un escenario con magnitud en el intervalo $[M, M + dM]$ y foco en un área dA de la fuente cuya tasa de excedencia es $\lambda(M)$ y de área A . Si además suponemos que la tasa está distribuida uniformemente en toda la superficie de la fuente, se obtiene que Ecuación (3.21).

$$Pr_i(\text{ocurrencia}) = -\frac{dA}{A} \frac{d\lambda(M)}{dM} dM \quad (3.21)$$

3.6.3 Pérdida máxima probable (PML)

Es aquella pérdida asociada a un periodo de retorno muy alto. Se calcula a partir de la tasa de excedencia de pérdidas que se muestra en la Ecuación (3.22)

$$v(p) = \frac{1}{Tr} = \sum_{i=1}^{N_s} (Pr_i(\text{ocurrencia}))(TESL_i) \quad (3.22)$$

Donde $v(p)$ es la tasa de excedencia de pérdidas y Tr es el periodo de retorno de pérdidas.

4. RESULTADOS

En esta sección se presentan los principales resultados de la evaluación probabilista del riesgo sísmico de hospitales en Lima. Los mapas con resultados de riesgo de cada pabellón por hospital se muestran en el ANEXO XIV, y la base de datos con los tres indicadores de riesgo calculados (acápites 0) se muestra en el ANEXO XI.

4.1 RESULTADOS DE ESL Y PAE

Para facilitar la visualización de los resultados, se utiliza la Tabla 4.1, que define niveles de riesgo y su correspondiente escala de colores) para la ESL y la PAE. Los niveles de riesgo para ESL (en porcentaje, %) se basan en la descripción de estados de daño mostradas en los reportes FEMA-273 (FEMA, 1997) y ATC-40 (ATC, 1996). Los niveles de riesgo para la PAE (alto, medio y bajo; valores al millar, ‰) se definen a partir de los resultados obtenidos por tipología estructural (Tabla 4.2). El escenario analizado para los resultados de ESL es el mostrado en el acápite 3.3 (Figura 3.8), que es el que origina las mayores pérdidas en la cartera analizada. Se recomienda desarrollar comparaciones similares a las de Hill & Rossetto (2008) en futuras investigaciones para la definición de este tipo de niveles.

Tabla 4.1. Niveles de riesgo definidos

	Niveles de riesgo	Valor
ESL	Completamente operativo	< 5%
	Operativo	< 12%
	No operativo-no estructural	< 20%
	No operativo-estructural	< 30%
	No operativo-colapso	< 70%
PAE	Bajo	< 8‰
	Medio	< 20‰
	Alto	<= 1000‰

La Tabla 4.2 muestra la variación entre los resultados de PAE y ESL para estructuras PRE y POST. La mayor parte de pabellones (79%) corresponde a construcciones de antes de 1997, que son las que mayor valor de PAE y ESL tienen entre (18% y 79%). La pérdida total por PAE es del orden de 31.9 millones de soles, que corresponde al 2% del valor total de reposición. La tipología con mayores pérdidas es la de adobe (MH), seguida por los pabellones de pórticos de concreto armado construidos antes de 1997 (PORT-PRE).

Tabla 4.2. Resultados de PAE y ESL por tipología estructural

Sistema Estructural	Pab	PAE		ESL Sismo ocasional (Mw=8.21)			
		#	%	(S/.)	(%)	(S/.)	(%)
DUAL-PORT	PRE	195	26%	S/. 9,268,467	20‰	S/. 114,537,678	24%
	POST	68	9%	S/. 947,395	6‰	S/. 12,950,326	9%
DUAL-MC	PRE	14	2%	S/. 3,175,926	12‰	S/. 46,079,075	18%
	POST	14	2%	S/. 172,357	5‰	S/. 2,070,481	6%
MC	PRE	268	36%	S/. 7,206,183	16‰	S/. 83,993,258	19%
	POST	41	6%	S/. 147,654	5‰	S/. 1,742,319	6%
	MH	69	9%	S/. 9,853,552	51‰	S/. 153,282,046	79%
	PREF	63	9%	S/. 1,024,414	32‰	S/. 11,816,759	37%
NI	PRE	2	0%	S/. 40,678	21‰	S/. 471,224	25%
	POST	3	0%	S/. 16,705	6‰	S/. 209,238	7%
Total	737	100%	S/. 31,853,330	20‰	S/. 427,152,404	26%	

La Tabla 4.3 y Tabla 4.4 muestran en resultado de PAE y ESL por hospital. El hospital con mayor PAE es el Hospital Víctor Larco Herrera (49 al millar), que está compuesto en su mayoría por pabellones de adobe (MH). Le sigue el Hospital Daniel Alcides Carrión (35 al millar), que está ubicado en un tipo de suelo S3-S4, y experimenta mayores demandas de aceleración por amplificación. Similar situación experimenta el Hospital San José del Callao, que también está ubicado en un mal tipo de suelo. La menor ESL la tienen los hospitales de Ventanilla, Luis Negreiros, Marino Molina, Jorge Voto-Bernales, entre otros que están compuestos en su mayor parte por edificios de pórticos y muros de concreto armado (DUAL-POST y PORT-POST). Por otro lado, el valor de ESL total es de 427 millones de soles, que equivale al 26% del valor total de reposición. El máximo valor de ESL también lo experimenta el Hospital Víctor Larco Herrera, y la distribución de pérdidas sigue un orden similar al de los valores de PAE de cada hospital.

Tabla 4.3. PAE por hospital

N	Nombre	Valor de Reposición		PAE	
		(m ²)	(%)	(S/.)	(%)
Hospitales MINSA	1 H. N. Daniel Alcides Carrion	S/. 98,139,062	6%	S/. 3,431,590	35%
	2 H. María Auxiliadora	S/. 57,971,920	4%	S/. 1,000,298	17%
	3 H. N. Hipólito Unanue	S/. 83,056,605	5%	S/. 1,163,523	14%
	4 H. N. Dos de Mayo	S/. 87,651,250	5%	S/. 2,125,389	24%
	5 H. N. Arzobispo Loayza	S/. 82,719,163	5%	S/. 1,318,083	16%
	6 H. De Emergencias Pediátricas	S/. 4,020,879	0%	S/. 59,615	15%
	7 H. de Emergencias José Casimiro Ulloa	S/. 11,764,091	1%	S/. 177,949	15%
	8 H. Madre Niño San Bartolomé	S/. 24,348,613	2%	S/. 445,160	18%
	9 H. N. Cayetano Heredia	S/. 61,167,224	4%	S/. 963,000	16%
	10 H. N. Sergio E. Bernales	S/. 38,652,117	2%	S/. 606,348	16%
	11 H. Víctor Larco Herrera	S/. 85,005,161	5%	S/. 3,871,232	46%
	12 H. San José del Callao	S/. 13,577,737	1%	S/. 350,744	26%
	13 H. José Agurto Tello de Chosica	S/. 7,767,623	0%	S/. 148,325	19%
	14 H. Hermilio Valdizan	S/. 25,936,083	2%	S/. 374,127	14%
	15 H. Carlos Lanfranco La Hoz	S/. 16,173,227	1%	S/. 413,888	26%
	16 H. De Ventanilla	S/. 11,664,397	1%	S/. 72,973	6%
	17 H. Vitarte	S/. 5,423,304	0%	S/. 116,211	21%
	18 H. Huaycan	S/. 5,419,991	0%	S/. 67,845	13%
	19 H. San Juan De Lurigancho	S/. 13,241,444	1%	S/. 212,583	16%
	20 H. Santa Rosa	S/. 22,176,121	1%	S/. 389,055	18%
Hospitales EsSalud	21 H. N. Alberto Sabogal	S/. 53,542,715	3%	S/. 1,201,314	22%
	22 H. N. Edgardo Rebagliati	S/. 230,616,892	14%	S/. 3,241,203	14%
	23 H. N. Guillermo Almenara	S/. 105,283,896	7%	S/. 1,743,136	17%
	24 H. De Emergencias Grau	S/. 28,412,938	2%	S/. 439,852	15%
	25 H. Luis Negreiros	S/. 28,670,303	2%	S/. 209,938	7%
	26 H. Marino Molina	S/. 19,720,039	1%	S/. 100,128	5%
	27 H. Octavio Mongrut	S/. 10,022,847	1%	S/. 195,320	19%
	28 H. De Vitarte	S/. 7,734,276	0%	S/. 192,583	25%
	29 H. Angamos	S/. 10,369,694	1%	S/. 201,172	19%
	30 H. Aurelio Díaz Ufano	S/. 13,514,203	1%	S/. 97,642	7%
	31 H. Jorge Voto Bernales	S/. 13,177,489	1%	S/. 67,634	5%
	32 H. San Isidro Labrador	S/. 14,110,384	1%	S/. 69,471	5%
	33 H. Carlos Alcántara	S/. 13,480,310	1%	S/. 93,659	7%
	34 H. Uldarico Rocca	S/. 12,046,840	1%	S/. 112,791	9%
Institutos MINSA	35 I. N. De Salud del Niño	S/. 90,015,725	6%	S/. 2,515,489	28%
	36 I. N. Materno Perinatal	S/. 57,509,084	4%	S/. 997,318	17%
	37 I. N. De Rehabilitación	S/. 17,825,010	1%	S/. 400,236	22%
	38 I. N. De Ciencias Neurológicas	S/. 24,283,428	2%	S/. 668,032	28%
	39 I. N. De Salud Mental HD-HN	S/. 24,591,601	2%	S/. 519,605	21%
	40 I. N. De Oftalmología	S/. 22,856,933	1%	S/. 362,101	16%
	41 I. N. De Enfermedades Neoplásicas	S/. 64,829,014	4%	S/. 1,116,770	17%
Total		S/. 1,618,489,637	100%	S/. 31,853,330	20%

Tabla 4.4. ESL por hospital

N	Nombre	Área Construida		ESL Sismo ocasional (Mw=8.21)	
		(m ²)	(%)	(S/.)	(%)
Hospitales MINSA	1 H. N. Daniel Alcides Carrion	48,825	6%	S/. 47,740,888	49%
	2 H. María Auxiliadora	28,842	4%	S/. 12,153,633	21%
	3 H. N. Hipólito Unanue	41,322	5%	S/. 14,148,980	17%
	4 H. N. Dos de Mayo	43,608	5%	S/. 30,708,024	35%
	5 H. N. Arzobispo Loayza	41,154	5%	S/. 15,764,486	19%
	6 H. De Emergencias Pediátricas	2,000	0%	S/. 735,498	18%
	7 H. de Emergencias José Casimiro Ulloa	5,853	1%	S/. 2,402,915	20%
	8 H. Madre Niño San Bartolomé	12,114	2%	S/. 5,714,131	23%
	9 H. N. Cayetano Heredia	30,431	4%	S/. 11,892,578	19%
	10 H. N. Sergio E. Bernales	19,230	2%	S/. 7,226,587	19%
	11 H. Víctor Larco Herrera	42,291	5%	S/. 60,329,397	71%
	12 H. San José del Callao	6,755	1%	S/. 4,082,167	30%
	13 H. José Agurto Tello de Chosica	3,864	0%	S/. 2,248,627	29%
	14 H. Hermilio Valdizan	12,904	2%	S/. 4,487,421	17%
	15 H. Carlos Lanfranco La Hoz	8,046	1%	S/. 4,702,981	29%
	16 H. De Ventanilla	5,803	1%	S/. 843,771	7%
	17 H. Vitarte	2,698	0%	S/. 1,302,363	24%
	18 H. Huaycan	2,697	0%	S/. 802,572	15%
	19 H. San Juan De Lurigancho	6,588	1%	S/. 2,455,785	19%
	20 H. Santa Rosa	11,033	1%	S/. 4,794,369	22%
Hospitales EsSalud	21 H. N. Alberto Sabogal	26,638	3%	S/. 13,559,376	25%
	22 H. N. Edgardo Rebagliati	114,735	14%	S/. 43,562,040	19%
	23 H. N. Guillermo Almenara	52,380	7%	S/. 22,192,802	21%
	24 H. De Emergencias Grau	14,136	2%	S/. 6,154,509	22%
	25 H. Luis Negreiros	14,264	2%	S/. 2,919,206	10%
	26 H. Marino Molina	9,811	1%	S/. 1,344,974	7%
	27 H. Octavio Mongrut	4,986	1%	S/. 2,277,605	23%
	28 H. De Vitarte	3,848	0%	S/. 2,069,692	27%
	29 H. Angamos	5,159	1%	S/. 2,802,928	27%
	30 H. Aurelio Díaz Ufano	6,723	1%	S/. 1,344,192	10%
	31 H. Jorge Voto Bernales	6,556	1%	S/. 878,143	7%
	32 H. San Isidro Labrador	7,020	1%	S/. 917,497	7%
	33 H. Carlos Alcántara	6,707	1%	S/. 1,344,366	10%
	34 H. Uldarico Rocca	5,993	1%	S/. 1,578,520	13%
Institutos MINSA	35 I. N. De Salud del Niño	44,784	6%	S/. 37,609,158	42%
	36 I. N. Materno Perinatal	28,611	4%	S/. 13,917,608	24%
	37 I. N. De Rehabilitación	8,868	1%	S/. 4,374,574	25%
	38 I. N. De Ciencias Neurológicas	12,081	2%	S/. 9,665,289	40%
	39 I. N. De Salud Mental HD-HN	12,235	2%	S/. 6,001,683	24%
	40 I. N. De Oftalmología	11,372	1%	S/. 4,317,477	19%
	41 I. N. De Enfermedades Neoplásicas	32,253	4%	S/. 13,783,592	21%
Total		805,219	100%	S/. 427,152,404	26%

La Tabla 4.5 muestra los resultados de PAE y ESL por distrito. El distrito con mayor cantidad de hospitales es Lima (Cercado), con 5 establecimientos. En este distrito, la PAE es de 20 al millar, valor considerado como de alto riesgo, ya que cuenta con hospitales de mediana antigüedad, como el Dos de Mayo, Arzobispo Loayza, entre otros. El distrito con mayor valor de PAE es Magdalena del Mar, (46 al millar), pues alberga al Hospital Larco Herrera. Otros distritos con alto valor de PAE son La Victoria, Bellavista, Puente Piedra, que también cuentan con hospitales compuestos por pabellones mayoritariamente antiguos. Por otro lado, los resultados de ESL indican que el distrito con mayor riesgo es Magdalena del Mar, y para el resto de Distritos se sigue un orden de riesgo similar al de los valores de PAE.

La Tabla 4.6 muestra los resultados de PAE y ESL por tipo de suelo. La mayor parte de los pabellones de hospitales (75%) se encuentra en suelo tipo S1 (buen suelo), y solo un 3% de pabellones se encuentran ubicados en suelo S3 o S4 (mal suelo). La Tabla 4.7 muestra que la mayor parte de pérdidas le corresponde a los hospitales administrados por el MINSA, con el 75% de pabellones (550 pabellones).

Tabla 4.5. PAE y ESL por distrito

Nombre	Hosp.		PAE		ESL Sismo ocasional (Mw=8.21)	
	#	%	(S/.)	(‰)	(S/.)	(%)
Ate	3	7%	S/. 376,639	20‰	S/. 4,174,627	22%
Bellavista	3	7%	S/. 5,033,140	30‰	S/. 65,674,838	39%
Breña	2	5%	S/. 2,877,589	25‰	S/. 41,926,635	37%
Callao	1	2%	S/. 209,938	7‰	S/. 2,919,206	10%
Carmen de La Legua	1	2%	S/. 350,744	26‰	S/. 4,082,167	30%
Comas	2	5%	S/. 706,476	12‰	S/. 8,571,560	15%
El Agustino	1	2%	S/. 1,163,523	14‰	S/. 14,148,980	17%
Jesús María	1	2%	S/. 3,241,203	14‰	S/. 43,562,040	19%
La Molina	1	2%	S/. 93,659	7‰	S/. 1,344,366	10%
La Victoria	3	7%	S/. 2,242,603	16‰	S/. 29,082,809	21%
Lima	5	12%	S/. 5,553,983	20‰	S/. 75,769,538	27%
Lurigancho - Chosica	1	2%	S/. 148,325	19‰	S/. 2,248,627	29%
Magdalena del Mar	1	2%	S/. 3,871,232	46‰	S/. 60,329,397	71%
Miraflores	2	5%	S/. 379,121	17‰	S/. 5,205,844	24%
Pueblo Libre	1	2%	S/. 389,055	18‰	S/. 4,794,369	22%
Puente Piedra	1	2%	S/. 413,888	26‰	S/. 4,702,981	29%
San Juan de Lurigancho	2	5%	S/. 310,225	12‰	S/. 3,799,977	14%
San Juan de Miraflores	1	2%	S/. 1,000,298	17‰	S/. 12,153,633	21%
San Martín de Porres	2	5%	S/. 1,482,605	17‰	S/. 17,894,261	21%
San Miguel	1	2%	S/. 195,320	19‰	S/. 2,277,605	23%
Santa Anita	2	5%	S/. 441,761	11‰	S/. 5,365,564	14%
Santa Anita-Ate	1	2%	S/. 69,471	5‰	S/. 917,497	7%
Surquillo	1	2%	S/. 1,116,770	17‰	S/. 13,783,592	21%
Ventanilla	1	2%	S/. 72,973	6‰	S/. 843,771	7%
Villa El Salvador	1	2%	S/. 112,791	9‰	S/. 1,578,520	13%
TOTAL	41	100%	S/. 31,853,330	20‰	S/. 427,152,404	26%

Tabla 4.6. PAE y ESL por tipo de suelo

Suelo	Pab.		PAE		ESL Sismo ocasional (Mw=8.21)	
	#	%	(S/.)	(‰)	(S/.)	(%)
S1	550	75%	S/. 24,305,318	19‰	S/. 330,837,023	26%
S2	168	23%	S/. 7,034,486	22‰	S/. 90,184,058	29%
S3+	19	3%	S/. 513,526	19‰	S/. 6,131,324	22%
Total	737	100%	S/. 31,853,330	20‰	S/. 427,152,404	26%

Tabla 4.7. PAE y ESL por administración hospitalaria

Adm	Pab		PAE		ESL Sismo ocasional (Mw=8.21)	
	#	%	(S/.)	(‰)	(S/.)	(%)
MINSA	591	80%	S/. 23,887,487	23‰	S/. 324,206,553	31%
ESSALUD	146	20%	S/. 7,965,843	14‰	S/. 102,945,850	18%
Total	737	100%	S/. 31,853,330	20‰	S/. 427,152,404	26%

4.2 RESULTADOS DE PML

La curva PML y los valores tabulados para diferentes periodos de retorno (T) se muestran en la Tabla 4.8 y la Figura 4.1. Para un valor de T de 500 años, la PML es del orden de 536 millones de soles, que equivale al 33% del valor de reposición de la cartera analizada. Este valor de T (500 años) es similar al establecido para el cálculo de la aceleración en el diseño de estructuras, que se establece en la Norma de Diseño Sismorresistente (SENCICO NTE E.030, 2014). El valor de PML para 500 años también es similar al asociado al ESL de Mw=8.21 (sismo ocasional, Figura 3.8), que equivale al 26% del valor de reposición (acápites 4.1). Este resultado de pérdida también resulta similar al experimentado en el sismo de Chile de 2010. En dicho evento, el 39% de pabellones (171 pabellones) de hospitales de la región de Maule colapsó después del sismo (OPS, 2010).

Tabla 4.8. PML tabulada para diferentes periodos de retorno

T (años)	PML (%)	PML (S/.)
50	13.9%	S/. 225,275,753
100	19.9%	S/. 322,454,268
200	25.8%	S/. 418,056,280
500	33.1%	S/. 536,376,365
1000	38.2%	S/. 617,576,042
2000	42.7%	S/. 691,576,945

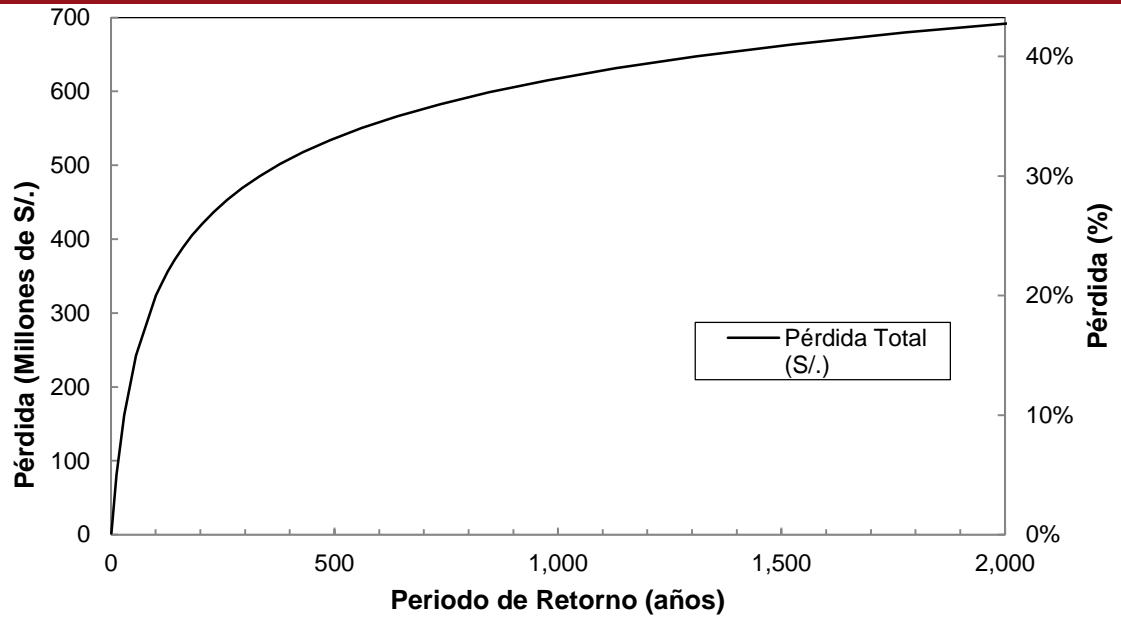
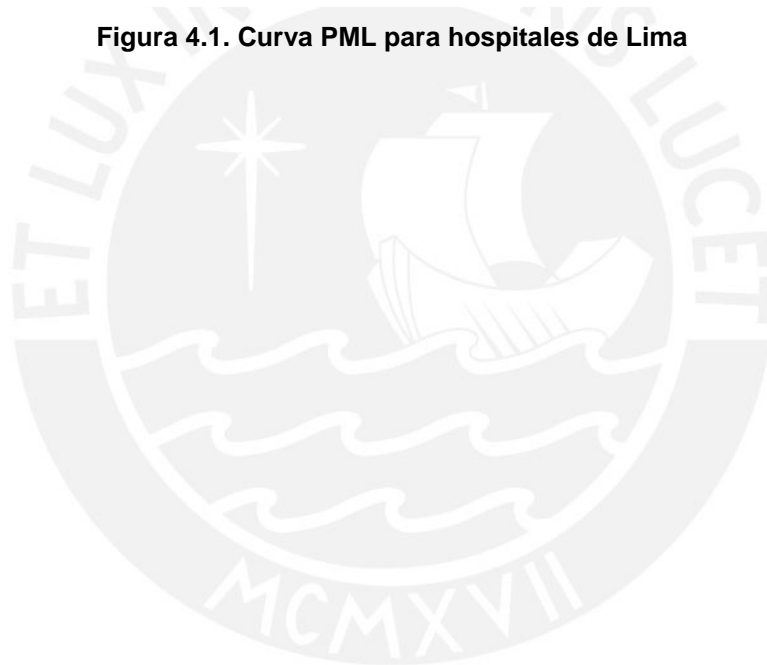


Figura 4.1. Curva PML para hospitales de Lima



5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y FUTURA INVESTIGACIÓN

5.1 CON RESPECTO A LOS ESTUDIOS EXISTENTES

- La mayor parte de estudios realizados no ha tomado en cuenta la totalidad de hospitales en Lima
- Los estudios realizados han empleado metodologías de evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo que se determina en base a índices o a la Escala de Intensidades de Mercalli
- La información existente ha servido para completar la base de datos y comparar la información recolectada.

5.2 CON RESPECTO A LA RECOLECCIÓN DE DATOS DE CAMPO Y LA BASE DE DATOS

- La recolección de información por medio de formularios digitales o dispositivos móviles (como *smartphones* o *tablets*) ayuda a la optimización y reducción de tiempo de inspección.
- Las bases de datos digitales permiten la actualización de la información según se vaya optimizando los componentes y campos de la misma.
- Las bases de datos georreferenciadas constituyen una herramienta útil para la búsqueda de edificios de hospitales en Lima.

5.3 CON RESPECTO A LA CARACTERIZACIÓN DE LA VULNERABILIDAD

- Los métodos de caracterización de vulnerabilidad utilizados son útiles para estimar de manera aproximada el comportamiento de las tipologías encontradas.
- Es necesario calibrar los parámetros utilizados en este estudio, tomados de referencias de normas existentes de otros países.

- Los métodos aproximados no reemplazan un análisis de vulnerabilidad detallado de los edificios estudiados.
- Es necesario desarrollar estudios de vulnerabilidad específicos para las tipologías de hospitales peruanos a fin de determinar de mejor manera su riesgo.

5.4 CON RESPECTO A LA EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO, LOS INDICADORES OBTENIDOS Y LA METODOLOGÍA CAPRA

- Los valores de ESL pueden ser útiles para actividades de rehabilitación y reconstrucción post sismo, y pueden calcularse para diversos escenarios.
- Se recomienda realizar futuras investigaciones para la definición de los niveles de riesgo para cada uno de los indicadores hallados.
- El valor de PAE es utilizado en el sector asegurador para el cálculo de primas de carteras de bienes contra terremotos. El sector asegurador peruano cobra una prima de entre 2 y 3 al millar, para protección contra sismos (APESEG). En este sentido, los valores encontrados son bastante altos, y pueden ser útiles para futuras estrategias de priorización de intervenciones de mitigación, aseguramiento y transferencia de riesgo.
- Es necesaria una revisión estructural del total de los pabellones de los hospitales de Lima para determinar el cumplimiento de las normas sísmicas actuales.
- Los indicadores hallados pueden servir para la priorización de intervenciones de reforzamiento futuras.
- La metodología y software CAPRA tienen la ventaja del ingreso de información por componentes (peligro-microzonificación, exposición y vulnerabilidad). Esto permite poder mejorar el estudio de componentes por separado para obtener resultados de riesgo más precisos.
- Se recomienda mejorar el estudio de microzonificación de Lima y las funciones de amplificación por tipo de suelo utilizadas.
- Los indicadores hallados pueden ser usados para el post procesamiento del riesgo holístico, según la metodología CAPRA u otros planteamientos.
- La metodología CAPRA (y el software CAPRA-GIS) utiliza planteamientos y métodos robustos de cálculo del riesgo en términos de pérdidas probables.
- Es necesario comparar los resultados del uso de esta metodología (CAPRA) con otras metodologías (y software) similares (SELENA-RISe, OpenQuake, HAZUS, entre otras). Esto permitirá determinar las ventajas y desventajas del uso de las diferentes metodologías de estimación del riesgo sísmico.

6. REFERENCIAS

- Aitsi-Selmi, A. y otros, 2015. The Sendai framework for disaster risk reduction: Renewing the global commitment to people's resilience, health, and well-being. *International Journal of Disaster Risk Science*, 62, pp. 164-176.
- ASCE, 2006. *Minimum design loads for buildings and other structures*, ASCE/SEI 7-05, Reston: American Society of Civil Engineers.
- ATC, 1985. *Earthquake Damage Evaluation Data for California (Report ATC-13)*, Redwood City: Applied Technology Council.
- ATC, 1988. *Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: A Handbook*, Redwood City: Applied Technology Council.
- ATC, 1996. *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings, volume 1 (ATC-40)*, Redwood City: Applied Technology Council.
- ATC, 2002. *Rapid visual screening of buildings for potential seismic hazards: A handbook (FEMA 154 report)*, Washington, D.C.: Federal Emergency Management Agency.
- Bal, I. E., Crowley, H. & Pinho, R., 2008. *Displacement-based earthquake loss assessment of Turkish masonry structures*. Beijing, 14th World Conference on Earthquake Engineering.
- Barbat, A. H., Moya, F. Y. & Canas, J., 1996. Damage scenarios simulation for seismic risk assessment in urban zones. *Earthquake spectra*, 123, pp. 371-394.
- BID, 2002. *Estudio previo para la Fase II del Diálogo Regional de Política del BID sobre Sistemas Nacionales para la Gestión Integral de Desastres: Financiamiento de la Reconstrucción*, s.l.: BID.

- Borzi, B., Crowley, H. & Pinho, R., 2008. Simplified pushover-based earthquake loss assessment (SP-BELA) method for masonry buildings. *International Journal of Architectural Heritage*, 24, pp. 353-376.
- Bruneau, M. & Reinhorn, A., 2007. Exploring the concept of seismic resilience for acute care facilities. *Earthquake Spectra*, 231, pp. 41-62.
- Calvi, G. M. y otros, 2006. Development of seismic vulnerability assessment methodologies over the past 30 years. *ISET journal of Earthquake Technology*, 433, pp. 75-104.
- Cardona, O., 2009. *La Gestión Financiera del Riesgo de Desastres. Instrumentos Financieros de Retención y Transferencia para la Comunidad Andina*, Lima: Comunidad Andina.
- Cardona, O. D. y otros, 2010. *Comprehensive approach for probabilistic risk assessment (CAPRA): International Initiative for disaster risk management effectiveness*. Ohrid, 14th European Conference on Earthquake Engineering.
- Cardona, O. D. y otros, 2011. *Enfoque Integral para la Evaluación Probabilista del Riesgo (CAPRA): Iniciativa Internacional para la Efectividad de la Gestión del Riesgo de Desastre*. Granada, 4º Conferencia Nacional de Ingeniería Sísmica.
- Cardona, O. D. y otros, 2012. *Comprehensive Approach to Probabilistic Risk Assessment: International Initiative for Risk Management Effectiveness - CAPRA*. Lisboa, World Conference on Earthquake Engineering (WCEE).
- Carreño, M. y otros, 2014. *Holistic Seismic Risk Assessment of Port of Spain: An Integrated Evaluation and Tool in the Framework of CAPRA*. Istanbul, Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology.
- CENAPRED, 2006. *Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos. Evaluación de la vulnerabilidad física y social*, México, D.F.: Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- CISMID, 2005. *Bases técnicas para la estimación de pérdidas con fines de seguros de terremoto. Informe preparado para la APESEG y la SBS*, Lima: CISMID-UNI.
- Colombi, M. y otros, 2008. Deriving vulnerability curves using Italian earthquake damage data. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 63, pp. 485-504.
- Cornell, A., 1968. Engineering Seismic Risk Analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 585, pp. 1583-1606.

- Crowley, H., Pinho, R. & Bommer, J. J., 2004. A probabilistic displacement-based vulnerability assessment procedure for earthquake loss estimation. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 22, pp. 173-219.
- D'Ayala, D. y otros, 2012. *Providing building vulnerability data and analytical fragility functions for PAGER*, Oakland: Earthquake Engineering Research Institute.
- D'Ayala, D. & Kishali, E., 2012. *Analytically derived fragility curves for unreinforced masonry buildings in urban contexts*. Lisbon, 15th World Conference on Earthquake Engineering.
- D'ayala, D. y otros, 2014. *Guidelines for Analytical Vulnerability Assessment of low/mid-rise Buildings*, Pavia: GEM Foundation.
- D'Ercole, R. & Metzger, P., 2009. Territorial vulnerability: a new risk approach in urban areas. *Cybergeo : European Journal of Geography*.
- DIPECHO/INDECI, 2012. *La gestión del riesgo de desastres en el Perú. Documento País 2012, Plan de Acción DIPECHO 2011-2012*, Lima: INDECI.
- ERN-AL, 2010. *Comprehensive Approach for Probabilistic Risk Assessment (CAPRA)*, Mexico, D.F.: Banco Mundial, Banco Interamericano de Desarrollo.
- ERN-AL, 2010. *Efectos de sitio 1.0.0.*, Mexico, D.F.: ERN-AL.
- ERN-AL, 2012. *CAPRA-GIS v2.0*, Bogota: CONSORCIO ERN AMÉRICA LATINA - ERN AL.
- ESRI, 2013. *ArcGIS 10.2 for Desktop*, Redlands: ESRI Inc.
- Esteva, L., 1967. *Criterios para la construcción de espectros para diseño sísmico*. Caracas, 3° Simposio Panamericano de Estructuras.
- FEMA/NIBS, 1999. *HAZUS 99. Earthquake loss estimation methodology*, Washington, D.C.: Federal Emergency Management Agency and National Institute of Buildings Sciences.
- FEMA, 1997. *NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings (FEMA 273)*, Whashington, D.C.: Federal Emergency Management Agency.
- FEMA, 2008. *HAZUS MH. Estimated Annualized Earthquake Losses for the United States (FEMA 366)*, Washington, D.C.: Federal Emergency Management Agency.

- FEMA, 2011. *HAZUS-MH 2.1. Multi-hazard loss estimation methodology: earthquake model. Technical Manual*, Washington, D.C.: Federal Emergency Management Agency.
- Hill, M. & Rossetto, T., 2008. Comparison of building damage scales and damage descriptions for use in earthquake loss modelling in Europe. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 62, pp. 335-365.
- Huerta, B., Ordaz, M. & Reinoso, E., 2011. *Propuesta de formato estándar para estudios de microzonificación sísmica y la experiencia de su aplicación en sistemas computacionales*. Aguascalientes, XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica - México.
- INDECI-PNUD, 2010. *Proyecto SIRAD: Sistema de Información sobre Recursos para Atención de Desastres*, Lima: COOPI.
- INEI, 2008. *Censos Nacionales 2007: XI de Población y VI de Vivienda*, Lima: INEI.
- INEI, 2014. *Censo de Infraestructura Educativa - CIE 2013*, Lima, Perú: Ministerio de Educación.
- Jaimes, M. y otros, 2016. A new approach to probabilistic earthquake-induced tsunami risk. *Ocean & Coastal Management*, Volumen 119, pp. 68-75.
- Jaiswal, K., Wald, D. & D'Ayala, D., 2011. Developing empirical collapse fragility functions for global building types. *Earthquake Spectra*, 273, pp. 775-795.
- Kappos, A. J. S. K. C. & P. K., 1998. Development of seismic risk scenarios based on a hybrid method of vulnerability assessment. *Natural Hazards*, 172, pp. 177-192.
- Karababa, F. S. & P. A., 2011. Damage data analysis and vulnerability estimation following the August 14, 2003 Lefkada Island, Greece, Earthquake. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 94, pp. 1015-1046.
- Kramer, S., 1996. *Geotechnical Earthquake Engineering*. New Jersey: Prentice Hall International Series.
- Kuroiwa, J., 2004. *Disaster Reduction: Living in Harmony With Nature*. Lima: UNDP.
- Kuroiwa, J. & Lazares, F., 1997. *Escala de Intensidades Mercalli Modificada para los Países Andinos (MMA-92)*. Trujillo, XI Congreso Nacional de Ingeniería Civil.
- Lagomarsino, S. & Giovinazzi, S., 2006. Macroseismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 44, pp. 415-443.

- Lang, D. H. & Corea, F. V. G., 2010. RISE: illustrating georeferenced data of seismic risk and loss assessment studies using Google Earth. *Earthquake Spectra*, 261, pp. 295-307.
- Lavell, A., 2003. *I. International Agency Concepts and Guidelines for Disaster Risk Management; II. The Transition from Risk Concepts to Risk Indicators*, Manizales: National University of Colombia.
- Lazares, F. & Rios, J., 1996. *Metodología para determinación de la vulnerabilidad estructural en instalaciones hospitalarias*, Lima: Organización Panamericana de la Salud (OPS) - Organización Mundial de la Salud (OMS).
- Liel, A. B. & Lynch, K. P., 2012. Vulnerability of reinforced-concrete-frame buildings and their occupants in the 2009 L'Aquila, Italy, earthquake. *Natural hazards review*, 131, pp. 11-23.
- Lomnitz-Adler, J. & Lomnitz, C., 1979. A modified form of the Gutenberg-Richter magnitude-frequency relation. *Bulletin of Seismological Society of America*, 694, pp. 1209-1214.
- Marulanda, M. y otros, 2013. Probabilistic earthquake risk assessment using CAPRA: application to the city of Barcelona, Spain. *Natural hazards*, 691, pp. 59-84.
- Masi, A., 2003. Seismic vulnerability assessment of gravity load designed R/C frames. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13, pp. 371-395.
- McCormack, T. C. & Rad, F. N., 1997. An earthquake loss estimation methodology for buildings based on ATC-13 and ATC-21. *Earthquake Spectra*, 134, pp. 605-621.
- Miranda, E., 1996. *Assessment of the seismic vulnerability of existing buildings*. Acapulco, 11th World Conference on Earthquake Engineering.
- Miranda, E., 1997. *Estimation of maximum interstory drift demands in displacement-based design*. Rotterdam, International Workshop on Seismic Design Methodologies for the Next Generation of Codes, pp. 253-264.
- Miranda, E., 1999. Approximate seismic lateral deformation demands in multistory buildings. *Journal of Structural Engineering*, 1254, pp. 417-425.
- Molina, S., Lang, D. H. & Lindholm, C. D., 2010. SELENA—An open-source tool for seismic risk and loss assessment using a logic tree computation procedure. *SELENA—An open-source tool for seismic risk and loss assessment using a logic tree computation procedure*, 363, pp. 257-269.

- Mora, M. y otros, 2015. Prioritizing interventions to reduce seismic vulnerability in school facilities in Colombia. *Earthquake Spectra*, 314, pp. 2535-2552.
- Muñoz, A., Blondet, M., Aguilar, R. & Astorga, M. A., 2007. Empirical fragility curves for peruvian school buildings. *Earthquake Resistant Engineering Structure*, 93VI, pp. 269-277.
- Muñoz, A., Quiun, D. & Tinman, M., 2004. *Repair and seismic retrofitting of hospital and school buildings in Peru*. Vancouver, 13th World Conference on Earthquake Engineering.
- NSET, 2004. *Guidelines for seismic vulnerability assessment of hospitals*, Nepal: National Society for Earthquake Technology-Nepal.
- OPS, 1997. *Diagnóstico de la Vulnerabilidad Sísmica en Hospitales del Perú*, Lima: Organización Panamericana de la Salud.
- OPS, 2008. *Índice de Seguridad Hospitalaria: Formularios para evaluación de hospitales seguros. Hospitales seguros frente a desastres*, Washington, DC: Organización Panamericana de la Salud.
- OPS, 2010. *El terremoto y tsunami del 27 de febrero en Chile. Crónica y lecciones aprendidas en el sector salud*, Santiago de Chile: Organización Panamericana de la Salud.
- Ordaz, M., 1999. *User's manual for program CRISIS-99. Technical Report*, Mexico, D.F.: Universidad Nacional Autonoma de Mexico.
- Ordaz, M., Aguilar, A. & Arboleda, J., 2007. *CRISIS2007 Ver 7.4*, México, D.F.: Universidad Nacional Autonoma de Mexico.
- Ordaz, M., Miranda, E., Reinoso, E. & Pérez-Rocha, L. E., 2000. *Seismic loss estimation model for Mexico City*. Auckland, 12th World Conference on Earthquake Engineering.
- Ordaz, M. & Santa-Cruz, S., 2003. *Computation of physical damage to property due to natural hazard events*, Manizales: National University of Colombia.
- Pinho, R., 2012. *GEM: a Participatory Framework for Open, State-of-the-Art Models and Tools for Earthquake Risk Assessment*. Lisbon, 15th World Conference on Earthquake Engineering.
- Pique, J. & Salinas, R., 2008. *Peruvian seismic design practice produced undamaged buildings in Peru's latest earthquakes*. Beijing, 14th World Conference on Earthquake Engineering.

- PREDES, 2011. *Evaluación de vulnerabilidad de infraestructura de salud y educación en Lima y Callao*, Lima: Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE).
- Reiter, L., 1990. *Earthquake Hazard Analysis: Issues and Insights*. s.l.:Columbia University Press.
- Reque, K., 2006. *Diagnóstico preliminar de la vulnerabilidad para establecimientos de salud en el Perú*, Lima: Ministerio de Salud. Oficina Nacional de Defensa Nacional.
- Rios, F. & Zavala, C., 2008. *Impact of the Pisco-Peru earthquake of August 15th 2007 on health facilities*. Beijing, 14th World Conference on Earthquake Engineering.
- RNE NTE E.030, 1997. *Diseño Sismorresistente*, Lima: SENCICO.
- RNE NTE E.030, 2003. *Diseño Sismorresistente*, Lima: SENCICO.
- Rojahn, C. y otros, 1997. Earthquake damage and loss estimation methodology and data for Salt Lake County, Utah (ATC-36). *Earthquake Spectra*, 134, pp. 623-642.
- Rossetto, T. & Elnashai, A., 2003. Derivation of vulnerability functions for European-type RC structures based on observational data. *Engineering structures*, 2510, pp. 1241-1263.
- Rossetto, T. & Elnashai, A., 2005. A new analytical procedure for the derivation of displacement-based vulnerability curves for populations of RC structures. *Engineering structures*, 273, pp. 397-409.
- Rossetto, T., Ioannou, I. & Grant, D. N., 2013. *Existing Empirical Fragility and Vulnerability Relationships: Compendium and Guide for Selection*, Pavia: GEM Foundation.
- Rossetto, T., Ioannou, I., Grant, D. N. & Maqsood, T., 2014. *Guidelines for Empirical Vulnerability Assessment*, Pavia: GEM Foundation.
- Rota, M., Penna, A. & Strobbia, C. L., 2008. Processing Italian damage data to derive typological fragility curves. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2810, pp. 933-947.
- Sadigh, K. y otros, 1997. Attenuation relationships for shallow crustal earthquakes based on California Strong Motion data. *Seismological Research Letters*, 681, pp. 180-189.

- San Bartolomé, A. & Quiun, D., 2008. *Seismic behaviour of masonry constructions in 2007 Pisco, Peru earthquake*. Beijing, 14th World Conference on Earthquake Engineering.
- Santa-Cruz, S., 2013. *Informe Interno TAP 2. Evaluación probabilista del riesgo sísmico de escuelas y hospitales de la ciudad de Lima. Componente 2: Evaluación probabilista del riesgo sísmico de locales escolares en la ciudad de Lima*, Lima: PUCP.
- Santa-Cruz, S., 2015. *Formulación para el cálculo de pérdidas probables. Curso de Análisis de Riesgo Sísmico*, Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Schneider, P. J. & Schauer, B. A., 2006. HAZUS—its development and its future. *Natural Hazards Review*, 72, pp. 40-44.
- SENCICO NTE E.030, 2014. *Proyecto de Norma de Diseño Sismorresistente*, Lima: SENCICO.
- SENCICO NTE E.030, 2016. *Norma de Diseño Sismorresistente*, Lima: SENCICO.
- Silva, V. y otros, 2014. Development of the OpenQuake engine, the Global Earthquake Model's open-source software for seismic risk assessment. *Natural Hazards*, 723, pp. 1409-1427.
- Silva, V. y otros, 2014. Investigation of the characteristics of Portuguese regular moment-frame RC buildings and development of a vulnerability model. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 135, pp. 1455-1490.
- Singhal, A. & Kiremidjian, A. S., 1996. Method for probabilistic evaluation of seismic structural damage. *Journal of Structural Engineering*, 12212, pp. 1459-1467.
- Tarque, N., Crowley, H., Pinho, R. & Varum, H., 2012. Displacement-based fragility curves for seismic assessment of adobe buildings in Cusco, Peru. *Earthquake Spectra*, 282, pp. 759-794.
- Tavera, H. & Buforn, E., 2001. Source mechanism of earthquakes in Peru. *Journal of Seismology*, 54, pp. 519-539.
- United Nations-ISDR, 2005. *Hyogo framework for action 2005-2015: building the resilience of nations and communities to disasters*. Kobe, Hyogo, World Conference on Disaster Reduction (A/CONF. 206/6).
- Velásquez, C. y otros, 2014. Hybrid loss exceedance curve (HLEC) for disaster risk assessment. *Natural Hazards*, 722, pp. 455-479.

- Whitman, R. V. y otros, 1997. Development of a national earthquake loss estimation methodology. *Earthquake Spectra*, 134, pp. 643-661.
- Yamaguchi, N. & Yamazaki, F., 2000. *Fragility curves for buildings in Japan based on damage surveys after the 1995 Kobe earthquake*. Auckland, 12th World Conference on Earthquake Engineering.
- Yamin, L. E., Hurtado, A. I., Barbat, A. H. & Cardona, O. D., 2014. Seismic and wind vulnerability assessment for the GAR-13 global risk assessment. *International journal of disaster risk reduction*, Volumen 10, pp. 452-460.
- Youngs, R., Chiou, S., Silva, W. & Humphrey, J., 1997. Strong Ground Motions Attenuation Relationships for Subduction Zone Earthquakes. *Seismological Research Letters*, 681, pp. 58-73.
- Zavala, C. & Estrada, M., 2008. *Behaviour of non-engineered houses during Pisco earthquake 15/8/2007*. Beijing, 14th World Conference Earthquake Engineering.
- Zeballos, A., 2012. *Seismic hazard mapping in Peru*. [En línea] Available at: <http://www.ecapra.org/seismic-hazard-mapping-peru> [Último acceso: 04 04 2015].