

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE
HUAMANGA**
**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS GEOLOGÍA Y
CIVIL**
ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



**EVALUACIÓN PROBABILISTA DEL RIESGO SÍSMICO DE
VIVIENDAS EN LA CIUDAD DE AYACUCHO CON PLATAFORMA
CAPRAGIS**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

PRESENTADO POR:
BACH. ZENÓN IRVING HUAMANÍ RODRÍGUEZ

ASESOR:
MG. ING. SAÚL WALTER RETAMOZO FERNÁNDEZ

COASESOR:
MG. ING. ANTONIO ZEBALLOS CABRERA

AYACUCHO - PERÚ

2019

**“EVALUACIÓN PROBABILISTA DEL RIESGO SÍSMICO DE VIVIENDAS EN
LA CIUDAD DE AYACUCHO CON PLATAFORMA CAPRAGIS”**

APROBACIÓN DEL BORRADOR DE TESIS : 25 DE OCTUBRE DE 2019

APROBACIÓN DE SUSTENTACIÓN : 23 DE DICIEMBRE DE 2019

.....
Dr. Ing. Efraín E. PORRAS FLORES
(Presidente)

.....
MSc. Ing. Rubén A. YACHAPA CONDEÑA
(Miembro)

.....
MSc. Ing. Saúl W. RETAMOZO FERNÁNDEZ
(Miembro)

.....
Ing. Christian LEZAMA CUELLAR
(Secretario Docente)

Según el acuerdo constatado en el acta, levantada el 23 de diciembre del 2019, en la sustentación de tesis profesional, presentado por el Bachiller en Ciencias de la Ingeniería Civil Sr. **ZENÓN IRVING HUAMANÍ RODRÍGUEZ**, con el Trabajo Titulado “**EVALUACIÓN PROBABILISTA DEL RIESGO SÍSMICO DE VIVIENDAS EN LA CIUDAD DE AYACUCHO CON PLATAFORMA CAPRAGIS**”, fue calificado con la nota de QUINCE (15) por lo que se da la respectiva **APROBACIÓN**.

.....
Dr. Ing. Efraín E. PORRAS FLORES
(Presidente)

.....
MSc. Ing. Rubén A. YACHAPA CONDEÑA
(Miembro)

.....
MSc. Ing. Saúl W. RETAMOZO FERNÁNDEZ
(Miembro)

.....
Ing. Christian LEZAMA CUELLAR
(Secretario Docente)

EVALUACIÓN PROBABILISTA DEL RIESGO SÍSMICO DE VIVIENDAS EN LA CIUDAD DE AYACUCHO CON PLATAFORMA CAPRAGIS

ZENÓN IRVING HUAMANÍ RODRÍGUEZ

Presentado a la Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil en cumplimiento
parcial de los requerimientos para optar el título de:

INGENIERO CIVIL DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE
HUAMANGA

2019

Autor : Zenón Irving Huamaní Rodríguez

Recomendado : MSc. Ing. Saúl W. Retamozo Fernández
Asesor de Tesis

Aceptado por : MSc. Ing. Rubén A. Yachapa Condeña
Director de la Escuela de Formación Profesional de Ingeniería Civil

© 2019; Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga (UNSCH), todos los derechos reservados. El autor de la investigación autoriza a la UNSCH - Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil (FIMGC), la reproducción de la tesis en su totalidad o en partes.

Presentación

La presente tesis es un trabajo de investigación que mi persona realizó para optar el título de Ingeniero Civil, de la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga. Esperando que este trabajo sirva a los profesionales y estudiantes inmersos en este campo de la Ingeniería Civil.

Zenón Irving Huamaní Rodríguez
zirving.hr@gmail.com
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD NACIONAL SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA
Ayacucho, Diciembre de 2019

Resumen

El objetivo fundamental de la presente investigación consiste en evaluar el riesgo sísmico de viviendas en la ciudad de Ayacucho. La estimación de riesgo sísmico de infraestructura debe considerar información técnica que tiene un alto grado de incertidumbre, razón por la cual la mejor manera de estimarlo es haciendo uso de modelos probabilistas que tomen en cuenta, de manera rigurosa, estas incertidumbres. En esta investigación, se ha realizado la estimación del riesgo sísmico haciendo uso de la plataforma CAPRAGIS, programa de código abierto desarrollado por iniciativa del Banco Mundial y que permite estimar pérdidas considerando incertidumbre en: la ubicación de los epicentros de los sismos, la magnitud de los eventos, la intensidad con que estos eventos se sentirán en un punto específico, la manera en que las construcciones responderán a estos eventos, etc.

La estimación del riesgo sísmico empleando CAPRAGIS requiere que se cuente con información de tres aspectos: La amenaza, la exposición y la vulnerabilidad de los elementos expuestos. Los resultados son expresados en métricas probabilistas, la Pérdida Anual Esperada (PAE) o Pérdida Máxima Probable (PML), los cuales contribuyen y sirven de apoyo a la buena toma de decisiones en la gestión financiera del riesgo.

Palabras claves: *Riesgo sísmico, amenaza sísmica, vulnerabilidad, exposición.*

Abstract

The main objective of this research is to assess the seismic risk of housing in the city of Ayacucho. Seismic risk estimation should consider technical information with high levels of uncertainty, which is the best way to estimate it by using probabilistic models that rigorously take these uncertainties in consideration. In this research, the CAPRAGIS program, which is an open source program developed by initiative of the World Bank was used. This program can estimate losses considering uncertainty in: the location of the epicenters of earthquakes, the magnitude of the events, the intensity (acceleration) of each event in a particular location, the way buildings respond to these events, etc.

The estimation of seismic risk using CAPRAGIS requires that information is available in three aspects: the seismic hazard, exposure and vulnerability of the exposed elements. The results are expressed in probabilistic metrics, the Expected Annual Loss (PAE) or Probable Maximum Loss (PML), which will contribute to a good decision making in the financial management of the risk.

Keywords: *Seismic risk, seismic hazard, vulnerability, exposure.*

Introducción

El Perú está asentado sobre un territorio, cuya configuración geográfica lo expone constantemente a fenómenos de carácter geológico. Uno de los fenómenos más devastadores presente en nuestro territorio son los sismos; la principal fuente que genera estos sismos se encuentra en la superficie de fricción existente entre las placas de Nazca y Sudamericana debido al proceso de subducción que se desarrolla entre ambas. Debido a esta característica y por su ocurrencia continua, a través del tiempo en Lima y otras ciudades se han presentado sismos de gran magnitud e intensidad. La historia sísmica nos muestra que en Perú se han alcanzado magnitudes de hasta 9.0Mw como el ocurrido en octubre de 1746; sismos recientes presentaron magnitudes de hasta 8.0Mw, tal es el caso de los ocurridos en mayo de 1940, octubre de 1966 y octubre de 1974 (IGP, 2010, p.8). Estos y otros sismos han originado cuantiosos daños materiales y pérdidas de vidas humanas; como es el caso del sismo de agosto de 2007 en Ica, que tuvo una magnitud de 7.9Mw, cuyos daños ascendieron a 2,000 millones de dolares y en el cual murieron más de 500 personas. (WSP, 2012, p.20)

De acuerdo al desarrollo urbanístico de Lima Metropolitana y otras ciudades, a través de los años, los posibles efectos desastrosos de estos sismos serían más fuertes debido principalmente a condiciones como antigüedad de las construcciones, mala calidad del material utilizado y principalmente al poco conocimiento de la calidad del suelo sobre el cual se ha levantado la ciudad y en otras áreas consideradas como proyectos de expansión urbana. (IGP, 2010, p.8)

En la ciudad de Ayacucho, un gran porcentaje de construcciones existentes son autoconstruidas, los cuales no siguieron código alguno de construcción. Además, si se agrega que la mayoría de viviendas en Ayacucho corresponden a casas de 1, 2 y 3 pisos y que precisamente este tipo de edificaciones son las que más sufrieron en los sismos producidos en el Perú; se observa que éstas estructuras merecen tener mayor importancia de la que comúnmente se les ha dado en la ciudad. (Quispe, 2004, p.6)

Ante ello, muchos investigadores han desarrollado métodos de análisis y evaluación de la vulnerabilidad de las edificaciones; así como de la implementación de la Gestión de Riesgo por región o por tipo de estructura (según su relevancia). Esto con el objetivo de prevenir y crear planes de mitigación de desastres ante probables escenarios de sismo.

Una de éstas iniciativas de investigación es el Enfoque Integral para la Evaluación Probabilista del Riesgo (CAPRA, por sus siglas en inglés: Comprehensive Approach for Probabilistic Risk Assessment) del Banco Mundial, el cual en conjunto con la oficina de Evaluación de Riesgos Naturales de América Latina (ERN-AL), han desarrollado e implementado una nueva tecnología de análisis de riesgo: CAPRAGIS. (Cardona *et al.*, 2011)

La iniciativa CAPRAGIS constituye una plataforma de información para apoyar la to-

ma de decisiones en la gestión del riesgo ante desastres naturales como sismos. CAPRAGIS 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 CAPRAGIS son expresados en métricas probabilistas, tales como la curva de probabilidad de excedencia, la pérdida anual esperada y la pérdida máxima probable. A su vez, CAPRAGIS permite la visualización del peligro, exposición y riesgo en un Sistema de Información Geográfica. (Cardona *et al.*, 2012)

El desarrollo de la estructura de la presente investigación está organizado de la siguiente manera:

- **Capítulo 1 – Planteamiento del problema:** Contiene la descripción de la realidad problemática, delimitación y formulación del problema, justificación e importancia, limitaciones y objetivos que siguen el trabajo de investigación.
- **Capítulo 2 – Estado del arte:** Se desarrolla los antecedentes bibliográficos, la fundamentación teórica de los conceptos y teorías relacionadas a los diferentes temas involucrados en la investigación, es decir, peligro sísmico, vulnerabilidad y riesgo sísmico. Asimismo, se describe brevemente el enfoque probabilista del riesgo sísmico con CAPRAGIS.
- **Capítulo 3 – Metodología de la investigación:** Contiene el tipo y nivel de investigación, población y muestra, variables e indicadores, técnicas e instrumentos utilizados. Asimismo, se presenta el procedimiento seguido para la evaluación del riesgo sísmico de viviendas en la ciudad de Ayacucho utilizando los lineamientos de CAPRA.
- **Capítulo 4 – Resultados:** Se presenta los principales resultados de la evaluación probabilista de riesgo sísmico en la cartera viviendas.
- **Capítulo 5 – Conclusiones:** Se presenta las conclusiones de la investigación en función a los objetivos planteados. Además se muestra algunas recomendaciones a tener en cuenta.
- **Referencias bibliográficas:** Se presenta información de los materiales consultados, citados durante el desarrollo de la tesis.
- **Anexos:** Se muestra las tablas de los parámetros de amenaza del Instituto Geofísico del Perú (IGP) que se utilizaron en la investigación. Además se adjunta mapas de riesgo sísmico de la cartera viviendas.

A mi abuelita, que ya no esta a mi lado, pero su cariño prevalece siempre en mi corazón, fue una mujer tolerante, honesta, bondadosa y generosa todos estos valores me los impartió élla en mi niñez.

Agradecimientos

- A mis padres, Rubén y Betty que me entregaron todo su total amor y apoyo, cuyo mejor regalo ha sido mi educación.
- A mi hermana, Aurea N. por siempre ofrecerme su amor, comprensión y apoyo .
- Al Mg. Ing. Saúl Walter Retamozo Fernández, mi asesor por su orientación incondicional para el desarrollo de la presente tesis.
- Al Mg. Ing. Antonio Zeballos Cabrera e Dra. Sandra Santa Cruz Hidalgo, por las enseñanzas, conocimientos y consejos inculcados; así como por su paciencia y tiempo, pudieron ayudarme a crecer profesional y personalmente.
- A mis amigos y compañeros de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga y otros que contribuyeron en el desarrollo de este trabajo.
- A mi alma mater la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga, a través de sus docentes de la Escuela de Formación Profesional de Ingeniería Civil quienes transmiten sus mejores conocimientos a los estudiantes quienes orgullosos de haber egresado somos forjadores del desarrollo de nuestro Ayacucho, a todos ellos mi especial consideración.

Índice general

Carátula	
Acta de Sustentación	I
Copyright	III
Presentación	IV
Resumen	V
Introducción	VI
Dedicatoria	VIII
Agradecimientos	IX
Índice General	X
Índice de Tablas	XIII
Índice de Figuras	XIV
Glosario	XVI
Siglas	XVIII
Simbolos	XX
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1. Descripción del problema	1
1.2. Delimitación del problema	2
1.2.1. Espacial	2
1.2.2. Temporal	2
1.2.3. Temática y unidad de análisis	2
1.3. Formulación del problema	2
1.3.1. Problema general	2
1.3.2. Problemas específicos	2
1.4. Justificación e importancia	2
1.5. Limitaciones de la investigación	3
1.6. Objetivos de la investigación	3
1.6.1. Objetivos generales	3

1.6.2.	Objetivos específicos	3
2.	ESTADO DEL ARTE	4
2.1.	Antecedentes bibliográficos	4
2.1.1.	Antecedentes a nivel internacional	4
2.1.2.	Antecedentes a nivel nacional	5
2.1.3.	Antecedentes a nivel local	6
2.2.	Marco conceptual	6
2.2.1.	Peligro sísmico	6
2.2.1.1.	Tipos de estudio de peligro sísmico	7
2.2.1.2.	Sismicidad	7
2.2.1.3.	Sismicidad global	9
2.2.1.4.	Sismicidad en el Perú	11
	Sismicidad histórica	12
	Sismicidad instrumental	12
2.2.1.5.	Principales fuentes sismogénicas en el Perú	13
2.2.2.	Evaluación de la sismicidad	14
2.2.2.1.	Intensidad	14
2.2.2.2.	Magnitud	15
2.2.3.	Vulnerabilidad sísmica	16
2.2.4.	Daño sísmico	17
2.2.4.1.	Daño estructural	17
2.2.4.2.	Daño no estructural	17
2.2.4.3.	Daño económico	17
2.2.5.	Riesgo sísmico	18
2.2.6.	Enfoque evaluación probabilista de riesgo con CAPRAGIS	18
3.	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	21
3.1.	Enfoque	21
3.2.	Alcance	21
3.3.	Diseño de investigación	21
3.4.	Población y muestra	21
3.4.1.	Población	21
3.4.2.	Muestra	21
3.5.	Operacionalización de variables, definición conceptual y operacional	22
3.6.	Técnicas e instrumentos	23
3.6.1.	Técnicas	23
3.6.2.	Instrumentos utilizados	23
3.7.	Desarrollo del trabajo de tesis	23
3.7.1.	Caso de estudio	24
3.7.2.	Evaluación de la amenaza sísmica	25
3.7.2.1.	Definición y caracterización de principales fuentes sismogénicas	26
3.7.2.2.	Recurrencia sísmica	28
3.7.2.3.	Leyes de atenuación	29
3.7.2.4.	Cálculo de Amenaza	30
3.7.2.5.	Algoritmo CRISIS 2007	31
3.7.2.6.	Selección de escenario crítico de análisis	34
3.7.2.7.	Modificación de parámetros por efectos de sitio	37
3.7.3.	Exposición	39
3.7.3.1.	Parámetros generales	40

3.7.3.2.	Nivel de resolución del modelo	40
3.7.3.3.	Levantamiento y recopilación de la información	41
3.7.3.4.	Procesamiento de la información	42
3.7.3.5.	Clasificación de las viviendas en el distrito de Ayacucho . . .	43
	Clasificación de vivienda en Ayacucho por el nivel socio-económico	45
3.7.3.6.	Valoración económica de viviendas	46
3.7.3.7.	Consolidación de la base de datos	48
3.7.4.	Vulnerabilidad	49
3.7.4.1.	Enfoque empleado	50
3.7.4.2.	Metodología para definir funciones de vulnerabilidad	52
	Estimación de funciones de vulnerabilidad a partir de curvas de fragilidad	53
	Función de vulnerabilidad a partir de la propuesta de Miranda	56
	Desviación estándar del daño	61
3.7.5.	Estimación del riesgo	61
3.7.5.1.	Parámetros de cuantificación del riesgo	62
	Pérdida anual esperada (PAE)	62
	Pérdida máxima probable (PML)	62
	Pérdida por escenario (ESL, por sus siglas en inglés)	62
3.7.5.2.	Metodología para el cálculo de las pérdidas probables	63
	Ingreso de base de datos	64
	Ingreso de datos de amenaza sísmica	64
	Ingreso de datos de vulnerabilidad	65
	Cálculo y obtención de pérdidas probables	66
4.	RESULTADOS	68
4.1.	Análisis e interpretación	68
4.1.1.	Resultados de PAE y ESL	68
4.1.2.	Resultados de PML	70
5.	CONCLUSIONES	72
5.1.	Conclusiones	72
5.2.	Recomendaciones	73
5.3.	Futuras líneas de investigación	74
	Referencia Bibliográfica	75
	ANEXOS	78
	Anexos	79
	A. Parámetros de Amenaza Sísmica	80
	B. Mapas de riesgo	86

Índice de tablas

2.1. Parámetros de los principales terremotos históricos que ocurrieron en el Perú entre los años 1513 y 1959	11
3.1. Operacionalización de variables identificadas	22
3.2. Estructura base de datos por lote (base catastro Ayacucho)	41
3.3. Construcciones en el distrito de Ayacucho (base catastro Ayacucho)	42
3.4. Esquema para la clasificación de la vivienda tipo casa independiente	44
3.5. Características de tipologías para el sector vivienda	44
3.6. Vivienda y niveles socioeconómicos	46
3.7. Distribución de hogares según NSE 2017 - Departamento de Ayacucho	46
3.8. Costo por m^2 de infraestructura en la sierra	48
3.9. Base de datos para formato GIS (SHAPES)	49
3.10. Características generales de la base de datos	49
3.11. Parámetros para funciones de fragilidad en viviendas de albañilería informal .	54
3.12. Factores de daño en viviendas	56
3.13. Parámetros para curva capacidad - Edificio tipo RM2M-LC	58
3.14. Parámetros de Miranda	60
4.1. PAE total cartera viviendas Ayacucho	68
4.2. PAE por tipología constructiva	69
4.3. ESL por tipología constructiva	69
4.4. PAE y ESL por tipo de suelo	70
4.5. PML para diferentes periodos de retorno	70
A.1. Coordenadas y esquema de ubicación de fuentes	80
A.2. Valor de parámetros de sismicidad por fuente	84

Índice de figuras

2.1. Propagación de la ruptura de la roca en el plano de falla	8
2.2. Ruptura en superficie que atraviesa la pista atlética de la escuela de Kuangfu, terremoto de Chi-Chi, 1999, Taiwan	8
2.3. Zonas sísmicas en el mundo (1900-2013)	9
2.4. Corrientes de convección en la astenosfera - bordes de expansión (izquierda) y subducción (derecha)	10
2.5. Placas tectónicas	11
2.6. Esquema que muestra la geometría de subducción y las principales fuentes sismogénicas del Perú	13
2.7. Relación entre valores de magnitud M_w , M_s y m_b (Idriss,1985)	16
2.8. Modelo probabilista de riesgo y algunas aplicaciones	20
3.1. Ubicación del distrito de Ayacucho	24
3.2. Los cuatro pasos de un PSHA	26
3.3. Fuentes de subducción tipo interplaca y asociadas a deformación cortical	27
3.4. Fuentes de sismicidad intraplaca.	27
3.5. Definición de escenario sísmico.	29
3.6. Determinación de fuentes sísmicas en CRISIS 2007. (Fuente 4/Tipo Subducción interplaca)	31
3.7. Asignación de parámetros de sismicidad en CRISIS 2007. (Fuente 16/Tipo cortical)	32
3.8. Asignación de GMPE a cada fuente sismogénica en CRISIS 2007 (Fuente 17/Tipo cortical)	32
3.9. Peligro Sísmico de Peru: PGA para $T_r=475$ Años	33
3.10. Curva de amenaza para la ciudad de Ayacucho (Ref. Catedral de la ciudad)	33
3.11. Ordenadas espectrales para sismos con diferentes periodos de retorno en la ciudad de Ayacucho (Ref. Catedral de la ciudad)	34
3.12. Mapa de amenaza sísmica elaborado por el IGP para Aceleración Máxima del Suelo (gal) y 10 % de probabilidad de excedencia en 50 años	35
3.13. Tabla de desagregación del modelo de amenaza sísmica en CRISIS 2007	36
3.14. Huella de intensidades (PGA en gals) para el escenario $M_w=5.5$	36
3.15. Amplificación sísmica del distrito de Ayacucho	37
3.16. Función de transferencia espectral para un suelo intermedio en la ciudad de Bogotá	38
3.17. Vista de la pantalla del programa Efectos de Sitio, para incluir microzonificación sísmica en CAPRA	39
3.18. Porcentajes de viviendas por pisos en el distrito de Ayacucho	43
3.19. Ejemplos de vivienda Tipo 1, casa de ladrillo	45
3.20. Ejemplos de vivienda Tipo 2, casa de adobe	45

3.21. Valor de reposición de viviendas del distrito de Ayacucho	47
3.22. Ejemplos de funciones de vulnerabilidad para sismos: (a) Función de vulnerabilidad elemento con falla frágil; (b) Función de vulnerabilidad elemento con falla dútil	50
3.23. Funciones de vulnerabilidad típicas: (a) Función de vulnerabilidad para tuberías; (b) Función de vulnerabilidad para reservorios	51
3.24. Valor esperado de daño y desviación estandar	51
3.25. Representación típica de una función de vulnerabilidad	52
3.26. Funciones de fragilidad para viviendas de albañilería tipo informal: (a) Función de fragilidad para viviendas de un piso ; (b) Función de fragilidad para viviendas de dos pisos	54
3.27. Funciones de fragilidad para viviendas de adobe	54
3.28. Matriz de probabilidad para vivienda de albañilería de un un piso (tipología “ALB-1”)	55
3.29. (a) Funciones de vulnerabilidad para viviendas de albañilería de un piso y viviendas de adobe ; (b) Funciones de vulnerabilidad para viviendas de albañilería de 2 y 3 pisos	56
3.30. Ejemplo de espectro de capacidad de un edificio (FEMA, 2003)	58
3.31. Curva de capacidad en formato $S_a - S_d$ (RM2M-LC)	59
3.32. Función de vulnerabilidad para viviendas de albañilería de 4 a 7 pisos	61
3.33. Visualización del archivo exposición en CAPRAGIS	64
3.34. Visualización del archivo amenaza en CAPRAGIS	64
3.35. Visualización del archivo microzonificación en CAPRAGIS	65
3.36. Vista parcial del programa CAPRA, que muestra el campo donde se define la función de vulnerabilidad	65
3.37. Cálculo de PML con software CAPRA	66
3.38. Mapeo de pérdidas relativas en CAPRAGIS para un área de viviendas del distrito de Ayacucho	66
4.1. Curva PML para viviendas del distrito de Ayacucho	71
B.1. Mapa del Riesgo Sísmico de la Cartera Viviendas	87
B.2. Mapa del Riesgo Sísmico para un escenario de Magnitud 5.5	88

Glosario

Amenaza: Peligro latente de que un evento físico de origen natural o causado por la acción humana se presente con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños o pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales. Las amenazas pueden ser geológicas, resultado de procesos internos y externos en la Tierra; hidrometeorológicas, que pueden ser exacerbadas por la variabilidad y el cambio climático.

Análisis de riesgo: En su forma más simple es el postulado de que el riesgo es el resultado de relacionar la amenaza y la vulnerabilidad de los elementos expuestos, con el fin de determinar los posibles efectos y consecuencias sociales, económicas y ambientales asociadas a uno o varios fenómenos peligrosos. Cambios en uno o más de estos parámetros modifican el riesgo en sí mismo, es decir, el total de pérdidas esperadas y consecuencias en un área determinada.

Daño: Efecto adverso o grado de destrucción causado por un fenómeno peligroso sobre las personas, los bienes, sistemas de prestación de servicios y sistemas naturales o sociales.

Escalas macrosísmicas: Es una escala usada para evaluar la fuerza de los movimientos de tierra basándose en los efectos destructivos en las construcciones humanas y en el cambio de aspecto del terreno, así como en el grado de afectación entre la población.

Exposición (elementos expuestos): Se refiere a la presencia de personas, medios de subsistencia, servicios ambientales, recursos económicos y sociales, bienes culturales e infraestructura, que por su localización pueden ser afectados por la manifestación de una amenaza.

Intensidad: Medida cuantitativa y cualitativa de la severidad de un fenómeno en un sitio específico.

Intervención correctiva: Proceso cuyo objetivo es reducir el nivel de riesgo existente en la sociedad a través de acciones anticipadas de mitigación, en el sentido principalmente de disminuir o reducir la vulnerabilidad de los elementos expuestos, llevar a cabo obras para su protección parcial o eliminar su exposición ante posibles eventos peligrosos mediante su relocalización.

Intervención prospectiva: Proceso cuyo objetivo es garantizar que no surjan nuevos riesgos a través de acciones de prevención, en el sentido de impedir que los elementos expuestos sean vulnerables o que lleguen a estar expuestos a posibles eventos peligrosos, incluidos los que puedan exacerbarse por el cambio climático. Su objetivo es evitar nuevos riesgos y la necesidad de intervenciones correctivas en el futuro.

Mitigación: Medidas de intervención prescriptiva o correctiva dirigidas a reducir o disminuir el riesgo en forma anticipada. Se implementa a través de reglamentos de seguridad y proyectos de inversión pública o privada, cuyo objetivo es reducir la vulnerabilidad existente o proveer una protección limitada frente a eventos peligrosos.

Plan de contingencia: Procedimientos operativos específicos y preestablecidos de coordinación, alerta, movilización y respuesta ante la manifestación o la inminencia de un fenómeno peligroso particular para el cual se tienen escenarios definidos.

Protección financiera: Mecanismos o instrumentos financieros de transferencia del riesgo, que se establecen ex ante, con el fin de acceder de manera ex post a recursos económicos oportunos para el manejo de desastres, incluidos recursos para H1a recuperación.

Resiliencia: Capacidad de un ecosistema o de una comunidad de absorber un impacto negativo o de recuperarse una vez a sido afectada por un fenómeno peligroso.

Riesgo: Es la probabilidad que se presente un nivel de consecuencias económicas, sociales o ambientales en un sitio particular y durante un período de tiempo definido. Se obtiene de relacionar la amenaza con la vulnerabilidad de los elementos expuestos.

Sismo: Es una vibración en la superficie terrestre, causada por la liberación súbita de energía acumulada en zonas de contacto entre placas tectónicas o en fallas geológicas.

Transferencia del riesgo: Acuerdo o contrato, mediante el cual una parte se compromete a tomar el riesgo y pagar las pérdidas que se pueden presentar a un cedente durante un periodo de tiempo, a cambio de una prima de riesgo.

Vulnerabilidad: Susceptibilidad o fragilidad física, económica, social, ambiental o institucional que tiene una comunidad ante los potenciales efectos adversos de un eventual suceso físico peligroso. Corresponde a la predisposición a la pérdida de (o a daños en) seres humanos y sus medios de subsistencia, sistemas físicos, sociales, económicos y de apoyo, por cuenta de eventos físicos peligrosos.

Siglas

APEIM	:	Asociación Peruana de Empresas de Investigación de Mercados
BID	:	Banco Interamericano de Desarrollo
BM	:	Banco Mundial
CAPRA	:	Comprehensive Approach for Probabilistic Risk Assessment
CISMID	:	Centro de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres
ERN-AL	:	Evaluación de Riesgos Naturales de América Latina
ESL	:	Expected Scenario Loss (Pérdida Esperada por Escenario)
FEMA	:	Federal Emergency Management Agency
GEM	:	Global Earthquake Model (Modelo Global de Terremotos)
GMPE	:	Ground Motion Prediction Equations (Ecuaciones de Predicción de Movimiento del Suelo)
IGP	:	Instituto Geofísico del Perú
IGV	:	Impuesto General a las Ventas
INDECI	:	Instituto Nacional de Defensa Civil
INEI	:	Instituto Nacional de Estadística e Informática
INGEMMET	:	Instituto Geológico Minero y Metalúrgico
ISDR	:	International Strategy for Disaster Reduction (Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres)
MDOF	:	Multiple Degree of Freedom (Múltiples Grados de Libertad)
MDR	:	Mean Damage Ratio (Relación Media de Daño)
MEF	:	Ministerio de Economía y Finanzas

MEP	: Material Estructural Predominante
NSE	: Nivel Socioeconómico
NTE	: Norma Técnica de Edificaciones
PAE	: Pérdida Anual Esperada
PGA	: Peak Ground Acceleration (Aceleración Máxima del Terreno)
PGD	: Peak Ground Displacement (Desplazamiento Máxima del Terreno)
PGV	: Peak Ground Velocity (Velocidad Máxima del Terreno)
PIS	: Parámetro de Intensidad Sísmica
PML	: Probable Maximum Loss (Pérdida Máxima Probable)
PSHA	: Probabilistic Seismic Hazard Assessment (Análisis Probabilista de Peligro Sísmico)
PUCP	: Pontificia Universidad Católica del Perú
SA	: Spectral Acceleration (Aceleración Espectral)
SBS	: Superintendencia de Banca y Seguros
SD	: Spectral Displacement (Desplazamiento Espectral)
SDOF	: Single Degree of Freedom (Un Grado de Libertad)
SENCICO	: Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción
SIG	: Sistema de Información Geográfica
SIRAD	: Sistema de Información para la Atención de Desastres en Lima
SV	: Spectral Velocity (Velocidad Espectral)
UNI	: Universidad Nacional de Ingeniería
USGS	: United States Geological Survey (Servicio Geológico de los Estados Unidos)
WSP	: Water and Sanitation Program (Programa de Agua y Saneamiento)

Simbolos

MM	:	Mercalli modificada
M	:	Magnitud
A_d	:	Amplitud del desplazamiento
A_0	:	Término de corrección en el cálculo de magnitud
R_c	:	Distancia al foco
M_L	:	Magnitud local
M_S	:	Magnitud de ondas superficiales
m_b	:	Magnitud de ondas de cuerpo
M_{ts}	:	Momento sísmico
S	:	Área de ruptura
Δ	:	Desplazamiento de la falla
G	:	Módulo de rigidez de la roca
M_w	:	Magnitud de momento
E	:	Energía liberada en un terremoto
R	:	Riesgo Sísmico
V	:	Vulnerabilidad de las construcciones
P	:	Amenaza sísmica
M_t	:	Valor monetario
$\lambda(M)$:	Tasa anual de excedencia correspondiente a la magnitud M
λ_0	:	Tasa anual de ocurrencia de eventos en la fuente

β	:	Parámetro de sismicidad empleado en la estimación de $\lambda(M)$
M_0	:	Magnitud mínima en la fuente
M_u	:	Magnitud máxima en la fuente
M_1	:	Límite inferior de M_u
M_2	:	Límite superior de M_u
$E[M_u]$:	Valor esperado de M_u
N_f	:	Número de fuentes
P_f	:	Número de subfuentes
Q_f	:	Número de magnitudes
Sa	:	Aceleración espectral
r_{rup}	:	Distancia más cercana al área de ruptura en Km
H_f	:	Profundidad focal en Km
R_o	:	Distancia de la fuente al sitio de interés en Km
$v(a)$:	Tasas de excedencia de intensidades
$Pr(A > \mathbf{a}/M, R_o)$:	Es la probabilidad de que la intensidad sea excedida por un cierto valor, dadas la magnitud del sismo M , y la distancia entre i-ésima fuente y el sitio R_i
$\phi(\cdot)$:	Distribución normal estandar
$E(A/M, R_0)$:	Valor esperado del logaritmo de la intensidad
σ_{Lna}	:	Desviación estándar del logaritmo de la intensidad
T	:	Periodo fundamental de vibración
Sa_{sup}	:	Aceleraciones espectrales a nivel de superficie
$A_{m\acute{a}x}$:	Aceleración máxima del terreno firme
$A_{A_{m\acute{a}x}}$:	Amplificación calculado para un valor de $A_{m\acute{a}x}$
Sa_{tf}	:	Aceleración espectral calculada a nivel del terreno firme

S	:	Factor de amplificación por microzonificación
$Pr(DS \geq ds_i/PIS)$:	Probabilidad de que un estado de daño DS en la estructura alcance o supere el estado de daño ds_i
αds	:	Media del $\ln(PIS)$ para cada estado de daño
βds	:	Desviación estándar del $\ln(PIS)$ para cada estado de daño
$Pr_{[E=i]}$:	Probabilidad de estar en un daño
$Pr_{[E>i]}$:	Probabilidad de estar o exceder un daño
L	:	Valor de pérdida o daño
$E(L)$:	Valor esperado de L
β_e	:	Daño relativo en cada estado de daño
$E\left(\frac{L}{\gamma_i}\right)$:	Valor esperado de pérdida para una distorsión determinada
γ	:	Distorsión máxima de entrepiso de la estructura
$\bar{\gamma}$:	Distorsión máxima de entrepiso asociada a una pérdida del 50% de valor total del inmueble
ρ	:	Parámetro de vulnerabilidad que define la curvatura de la función
Sd	:	Desplazamiento espectral
V_b	:	Cortante basal
Δ_t	:	Desplazamiento del edificio en el techo
α_1	:	Masa efectiva del primer modo de vibración
Γ	:	Factor de participación modal
α_2	:	Fración de la altura total en el punto de observación del desplazamiento
m_i	:	Masa total en cada uno de los niveles del edificio para el primer modo de vibración
ϕ_i	:	Desplazamiento total en cada uno de los niveles del edificio para el primer modo de vibración
Dy	:	Desplazamiento espectral de fluencia

Du	:	Desplazamiento espectral de comportamiento último
Ay	:	Aceleración espectral de fluencia
Au	:	Aceleración espectral de comportamiento último
C_s	:	Coefficiente de diseño sísmico
T	:	Periodo estructural elástico
γ_t	:	Relación entre el esfuerzo de fluencia y el de diseño
λ	:	Relación entre el esfuerzo último y el de fluencia
μ	:	Ductilidad (relación entre el desplazamiento último y λ veces el desplazamiento de fluencia)
$Sa_{50\%}$:	Aceleración espectral asociado a una pérdida del 50 % de valor total del inmueble
$Sd_{50\%}$:	Desplazamiento espectral asociado a una pérdida del 50 % de valor total del inmueble
H	:	Altura del edificio
β_1	:	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
β_2	:	Relación entre la máxima distorsión de entrepiso y la distorsión global de la estructura
β_3	:	Relación entre el máximo desplazamiento lateral del modelo inelástico y el desplazamiento máximo del modelo elástico
β_4	:	Relación entre los factores β_2 elástico e inelástico
h	:	Altura de entrepiso de la edificación
α	:	Parámetro adimensional que mide el grado de participación de deformaciones laterales de corte y flexión
$E(L/Sa)$:	Valor esperado de pérdida L dada una intensidad Sa
$SD(L)$:	Desviación estándar de la pérdida L
$SD^2(L)$:	Varianza de la pérdida L

$SD_{mx}^2(L)$:	Varianza máxima
L_0	:	Valor de pérdida para el cual ocurre $SD_{mx}^2(L)$
F_{Ai}	:	Frecuencia de ocurrencia anual del escenario i
ESL_i	:	Valor de la pérdida esperada debido al escenario i
$\nu(p)$:	Tasa de excedencia de la pérdida p
$\Pr(P > p/i)$:	Probabilidad de excedencia de la pérdida p , cuando ocurre el escenario i
$ESL_{j,i}$:	Valor de la pérdida esperada de la edificación j debido a la ocurrencia del escenario i

Capítulo 1

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema

El Perú está localizado dentro de una de las zonas sísmicas más activas del planeta correspondiendo a los bordes del Océano Pacífico. Debido a ello el Perú ha sido sometido a una serie de movimientos sísmicos que ha dado como resultado víctimas humanas y cuantiosos daños en edificaciones. En la ciudad de Ayacucho, un gran porcentaje de construcciones existentes son autoconstruidas, precisamente este tipo de edificaciones (casas de 1,2 y 3 pisos) son las que más sufrieron en los sismos producidos en el Perú; se observa que éstas estructuras merecen tener mayor importancia de la que comúnmente se les ha dado en la ciudad. (Quispe, 2004, p.6)

Ante ello, en la ciudad de Ayacucho en los últimos años se han realizado diversas investigaciones para la evaluación del riesgo en diferentes tipos de edificaciones; la mayoría de tales investigaciones contemplan evaluaciones del riesgo mediante pérdidas asociadas a un determinado valor de aceleración. Es decir, éste parámetro es un indicador del nivel de daño que muestra un valor de pérdida para un evento determinado. Si bien es cierto este tipo de análisis puede ser muy razonable para temas de prevención y mitigación de riesgo, es necesario realizar evaluaciones de tipo probabilista del riesgo, debido a que ella proporciona información para un conjunto completo de eventos que definan una amenaza particular e integre todos los escenarios posibles mediante un análisis riguroso. Así, el riesgo puede expresarse en términos de pérdidas económicas máximas probables, información fundamental para establecer, por ejemplo mecanismos de protección financiera.

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. La iniciativa CAPRAGIS constituye una plataforma de información para apoyar la toma de decisiones en la gestión del riesgo ante desastres naturales como sismos. CAPRA ha sido utilizado en Colombia, México, Perú, Bolivia, Ecuador, Guyana, Jamaica, los países de Centro América, España, Nepal y sus experiencias son una contribución para el actual desarrollo del Global Earthquake Model (GEM). (Cardona *et al.*, 2012).

1.2. Delimitación del problema

1.2.1. Espacial

Ubicado en el distrito de Ayacucho, región Ayacucho.

1.2.2. Temporal

La investigación se realiza a partir, enero de 2019 hasta junio de 2019

1.2.3. Temática y unidad de análisis

La unidad de análisis son las edificaciones destinadas a vivienda en el distrito de Ayacucho, sobre ellas se desarrolla la evaluación probabilista de riesgo sísmico utilizando los lineamientos de CAPRA.

1.3. Formulación del problema

1.3.1. Problema general

- ¿Cómo determinar de manera probabilista el riesgo sísmico de viviendas en la ciudad de Ayacucho empleando la plataforma CAPRAGIS?

1.3.2. Problemas específicos

- ¿Cómo evaluar de manera probabilista el peligro sísmico del Perú utilizando el modelo de sismicidad del Instituto Geofísico del Perú (IGP) realizado el 2014?
- ¿Qué procedimientos se deben seguir en la recopilación y procesamiento de los datos de exposición para desarrollar una base de datos en sistemas de información geográfica (SIG)?
- ¿Cuáles son las funciones de vulnerabilidad por tipología estructural para viviendas en la ciudad de Ayacucho?
- ¿Qué tipología constructiva concentra los mayores riesgos como resultado de una evaluación probabilista del riesgo sísmico en la ciudad de Ayacucho?

1.4. Justificación e importancia

Si bien es cierto que el país ha sido sometido a una serie de movimientos sísmicos y que estas han generado diversas pérdidas humanas y cuantiosos daños materiales, la incorporación formal de la evaluación y la gestión del riesgo en los procesos de planificación referidas a la prevención en gobiernos locales ha sido, hasta ahora, muy escasa.

Los enfoques actuales frente a la gestión del riesgo de desastres se caracterizan porque han pasado de la acción remedial, a la acción prospectiva; es decir, de las obras de mitigación, los preparativos y respuesta a emergencias, a la identificación y priorización de los riesgos y su incorporación en la planeación del desarrollo, adoptando medidas de gestión financiera, recuperación y acciones ex post en caso de desastre. Esto ha permitido que los gobiernos locales y nacionales direccionen sus esfuerzos hacia acciones integrales para evitar o reducir

sus riesgos, establecer alertas tempranas y aumentar su resiliencia. (Yamin *et al.*, 2013)

Tradicionalmente el impacto de los desastres ha sido absorbido por el gobierno central, con la presente investigación se pretende que, a partir de estimaciones probabilistas de riesgo, estas pérdidas sean compartidos a gobiernos regionales y/o municipales; con tal propósito se procura identificar diversos mecanismos de gestión financiera de riesgo, como por ejemplo los sistemas de seguros y reaseguros, prestamos contingentes, fondos emergentes, entre otros.

Actualmente en la ciudad de Ayacucho el hecho de no contar con modelos adecuados que permitan cuantificar el riesgo en términos objetivos, limita el proceso de toma de decisiones desde la perspectiva de la planificación física, la reducción y la financiación. Si la cuantificación de las pérdidas futuras no forma parte del proceso de planificación e inversión, es casi imposible mantener los recursos presupuestales para enfrentar y reducir dichas pérdidas potenciales.

Por las razones anteriores, en la presente investigación se usa el software CAPRAGIS debido a que ella está orientada a la generación de modelos probabilistas. El uso de esta herramienta constituye una plataforma de información para apoyar la toma de decisiones en la gestión del riesgo ante desastres naturales como sismos.

1.5. Limitaciones de la investigación

- Actualmente en la ciudad de Ayacucho no se tienen estudios de microzonificación que abarquen y engloben a la mayor parte de los elementos expuestos.
- En el Perú son muy pocos las publicaciones que han determinado funciones de vulnerabilidad de manera explícita para su empleo en estimaciones probabilistas del riesgo.

1.6. Objetivos de la investigación

1.6.1. Objetivos generales

- Evaluar de manera probabilista el riesgo sísmico de viviendas en la ciudad de Ayacucho en términos de pérdidas económicas probables empleando la plataforma CAPRAGIS.

1.6.2. Objetivos específicos

- Evaluar de manera probabilista el peligro sísmico del Perú utilizando el modelo de sismicidad del Instituto Geofísico del Perú (IGP) realizado el 2014.
- Actualizar y sistematizar la base de elementos expuestos en sistemas de información geográfica (SIG).
- Buscar y establecer funciones de vulnerabilidad a cada tipología estructural.
- Determinar la tipología constructiva que concentra los mayores riesgos como resultado de una evaluación probabilista del riesgo sísmico en la ciudad de Ayacucho.

Capítulo 2

ESTADO DEL ARTE

2.1. Antecedentes bibliográficos

En los últimos años se han desarrollado muchas investigaciones acerca de la estimación de vulnerabilidad así como de la implementación de políticas adecuadas para la gestión del riesgo. A continuación se presentan algunas de esas investigaciones:

2.1.1. Antecedentes a nivel internacional

Análisis del riesgo sísmico en zonas urbanas mediante Sistemas de Información Geográfica: aplicación a la ciudad de Granada. (Asenjo *et al.*, 2006)

En esta investigación se realizó la evaluación de riesgo sísmico de la ciudad de Granada (80,677 edificios). Empleando herramientas de los SIG, se estiman de manera cualitativa, la vulnerabilidad de los edificios en función de diferentes factores (cimentación, estructura, y altura). A partir de la vulnerabilidad y considerando la máxima magnitud esperada de un terremoto en el entorno de la cuenca Granada ($M_w = 6.5$), se evalúa el riesgo sísmico, expresado por el número de edificios afectados y el grado de pérdidas previsible, así como su efecto sobre la población.

Modelación Probabilista del Riesgo Sísmico para la ciudad de David. (CAPRA, 2012)

En esta investigación, realizada en Panamá, se han ampliado y mejorado estudios anteriores y se han evaluado las pérdidas estructurales por terremoto haciendo uso del programa de evaluación de daños CAPRAGIS. Los resultados de esta evaluación se presentan en forma de mapas desarrollados haciendo uso de SIG. El alcance del proyecto, en su capa de exposición incluye examinar los denominados “portafolios” de vivienda, educación y salud. De estos tres sectores las mayores pérdidas se encuentran concentradas en el sector vivienda, donde: las edificaciones de albañilería reforzada y sin reforzar constituyen la enorme mayoría de edificaciones en total en la ciudad de David; en las no reforzadas se encuentra la mayor probabilidad de pérdidas físicas o el mayor riesgo, mientras que en las reforzadas se concentra una mayor cantidad de valor físico y de ocupación humana, pero que se encuentra bajo menos riesgo.

2.1.2. Antecedentes a nivel nacional

Evaluación de Riesgo Sísmico del Centro Histórico de Chiclayo. (Olarte *et al.*, 2006)

En esta investigación se introducen las definiciones de peligro y vulnerabilidad sísmica necesarias en la evaluación del riesgo sísmico. Para el peligro sísmico se estimaron máximas aceleraciones para Chiclayo, teniendo en cuenta las investigaciones de J. Alva (UNI) y A. Muñoz *et al* (PUCP). Estas aceleraciones corresponden a tres sismos asociadas a periodos de retorno de 45 años, 75 años y 475 años (sismos frecuente, ocasional y raro). Los valores estimados de aceleración son de 0.20g, 0.25g y 0.42g respectivamente. Por otra parte, para los efectos de sitio se recopiló información de la zonificación geotécnica de Chiclayo (CISMID, 1992) y el mapa geológico de la zona (INGEMMET), complementando toda esta información con la realización del ensayo geofísico de microtrepidaciones en 50 puntos del cercado de la ciudad de Chiclayo, clasificando el área en 2 zonas: la zona “A” correspondiente a suelos con un periodo comprendido entre 0.5 y 0.7 seg., y la zona “B” con periodos comprendidos entre 0.7 y 0.9 seg. Con toda esta información recopilada y generada pudo caracterizarse la “zonificación geotécnica sísmica” del centro histórico de Chiclayo. La vulnerabilidad sísmica es evaluada con el método del Índice de Vulnerabilidad, donde se recogió la información de campo y se efectuó la evaluación de 2342 edificaciones. Del total de las estructuras evaluadas, el 49.5 % representan las edificaciones de tierra (adobe y quincha), mientras que el 40 % son de albañilería y el 10.5 % de concreto armado. Las estructuras de adobe en general presentan una vulnerabilidad alta, mientras que las de albañilería y concreto armado presentan en promedio una vulnerabilidad media, con un considerable porcentaje de éstas con vulnerabilidad alta, esto debido a que Chiclayo esta atravesando un largo periodo de silencio sísmico y se ha ido descuidando las precauciones básicas de protección frente a terremotos. Relacionando los índices de vulnerabilidad de las edificaciones evaluadas con las funciones de vulnerabilidad calibradas para Chiclayo, se determinaron los índices de daño. Los escenarios de daño sísmico en la ciudad se presentan para los sismos frecuente, ocasional y raro. Finalmente el riesgo sísmico es mostrado en una curva de “pérdida máxima probable social (PML)”, donde se estima un 26.8 % de pérdidas debido a daños en las estructuras para el sismo raro.

Evaluación probabilista del riesgo sísmico de locales escolares en la ciudad de Lima. (Santa-Cruz, 2013)

Esta investigación presenta los resultados de la evaluación del riesgo sísmico de los locales escolares públicos de Lima Metropolitana. El proyecto fue ejecutado por el Departamento de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) en el marco del convenio de asistencia técnica con el Banco Mundial (BM) y en coordinación con el Ministerio de Economía y Finanzas (MEF).

El proyecto consistió en levantar información de campo, caracterizar los tipos de locales escolares ubicados en la Ciudad de Lima y Callao según su desempeño esperado en eventos sísmicos y calcular las pérdidas probables. Se consideraron los estudios de peligro sísmico elaborados por el Instituto Geofísico del Perú (IGP), la microzonificación sísmica para el Proyecto SIRAD ejecutado por INDECI y estudios sobre desempeño sísmico de infraestructura educativa realizados en la PUCP.

La evaluación de las pérdidas probables se llevó a cabo mediante una plataforma de sis-

tema de información geográfica (CAPRAGIS). Se obtuvo valores de pérdidas esperadas para diversos escenarios sísmicos, pérdidas probables para distintos periodos de retorno y pérdidas anuales esperadas.

Los resultados del cálculo confirman la hipótesis del alto riesgo en infraestructura educativa de la Ciudad de Lima y revelan la necesidad urgente de reforzamiento de sus estructuras. La PAE para toda la base de datos es 46,6 millones de soles, que es del orden del 3.3 % del valor de reposición de la infraestructura. La razón de tan alto valor se debe al gran porcentaje de edificaciones construidas antes de 1997 y con sistemas estructurales poco eficientes ante cargas sísmicas. Los valores altos de PAE muestran la poca factibilidad de una política seria de aseguramiento de la infraestructura de los locales escolares.

2.1.3. Antecedentes a nivel local

Evaluación de Riesgo Sísmico en la Ciudad de Ayacucho. (Quispe, 2004)

En esta investigación se desarrolló el cálculo de riesgo sísmico en la ciudad de Ayacucho a partir de los componentes peligro, vulnerabilidad y exposición. Para el peligro sísmico se estimaron aceleraciones máximas de 0.37g, 0.32g y 0.1g (PGA), que corresponden a sismos con periodos de retorno de 950 años, 475 años y 25 años con un nivel de exedencia de 10 % respectivamente, basados en la teoría de (Cornell, 1968) en términos probabilistas, metodología que fue implementada en el programa de computo Risk por (McGuire, 1976). Por otra parte, para los efectos de sitio se realizaron mapas de zonificación en función a la amplificación sísmica, clasificando parte de la ciudad en tres zonas: la zona “1” con amplificaciones de 1 a 1.5, la zona “2” con amplificaciones de 1.5 a 2 y la zona “3” con amplificaciones de 2 a 2.5, para el mapeo se consideraron estudios anteriores como microtrepidaciones, geotécnica, geológicos y topográficos del área de estudio. La vulnerabilidad sísmica es evaluada con el método de Índice de Vulnerabilidad, para ello se recogieron datos de la exposición y se efectuó la evaluación de 1527 edificaciones, de los cuales el 64.77 % son de albañilería, 30.32 % son de adobe y otros representan el 4.91 %, los resultados nos muestran que las edificaciones de albañilería tienen una vulnerabilidad de media a baja en la mayoría, mientras que en las de adobe, tapial y piedra tienen una vulnerabilidad de media a alta. Relacionando en Índice de Vulnerabilidad con funciones de vulnerabilidad, y considerando las aceleraciones estipuladas en la amenaza sísmica se calcularon índices de daño. Finalmente a partir de los índices de daño y el valor expuesto de las edificaciones, se calcularon pérdidas directas asociados a cada valor de aceleración.

2.2. Marco conceptual

En esta sección se desarrollan los conceptos y teorías relacionadas a los diferentes temas involucrados en la investigación, es decir, peligro sísmico, vulnerabilidad, riesgo sísmico, entre otros. Asimismo, se describe brevemente el enfoque probabilista del riesgo sísmico con CAPRAGIS.

2.2.1. Peligro sísmico

Es una medida cuantitativa de la amenaza que los sismos representan en un determinado lugar; esta descripción cuantitativa deberá al menos relacionar una medida de la intensidad

del movimiento sísmico con el periodo de retorno, o su inverso, la tasa de excedencia anual. (Zeballos, 2005, p.2)

Dado que los parámetros inherentes al movimiento son el desplazamiento, la velocidad y la aceleración, el peligro sísmico es a menudo estimada en función de los valores máximos de estos parámetros, denominados habitualmente PGD, PGV y PGA, pero también es habitual su expresión en términos de Intensidad macrosísmica, relacionada con la destructividad del terremoto. La elección del parámetro depende de los condicionantes propios de la evaluación y de la aplicación a la que ésta vaya dirigida. (Benito y Cabañas, 1999)

2.2.1.1. Tipos de estudio de peligro sísmico

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). (Palomino y Tamayo, 2016, p.23)

- 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.
- El análisis probabilista toma en cuenta todos los posibles eventos que puedan afectar la zona de estudio, considerando la frecuencia 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.

2.2.1.2. Sismicidad

Actualmente el avance científico ha permitido mejorar el conocimiento acerca del origen, evaluación del tamaño y forma de propagación, entre otras características de los sismos dentro de la corteza terrestre. Los sismos ocurren cuando el esfuerzo en la tierra alcanza un nivel mayor a la resistencia de la roca, causando que los lados opuestos de la misma fallen repentinamente o se deslicen violentamente pasando de un lado a otro. Estos esfuerzos pueden actuar perpendicularmente a la falla empujando las rocas entre ellas o paralelamente a la falla moviendo las rocas unas contra otras, liberando así la energía almacenada en forma de ondas sísmicas, las cuales mueven las rocas a su alrededor. (Chura, 2012, pp.13,14)

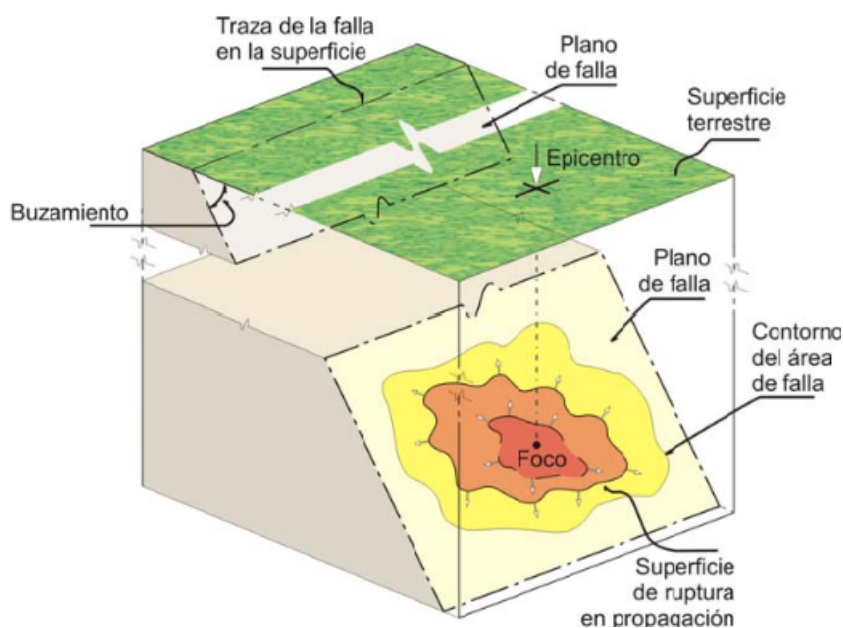


Figura 2.1: Propagación de la ruptura de la roca en el plano de falla

Fuente: Adaptado de (Muñoz, 2013, p.9)

Un sismo empieza en un punto llamado foco o hipocentro situado en la superficie de ruptura de la falla que se localiza por una latitud, longitud y profundidad. La proyección del foco en la superficie de la tierra, se denomina epicentro, y es referenciado con coordenadas de latitud y longitud únicamente. Como se observa en la Figura 2.1 la ruptura progresa desde el hipocentro a lo largo de la superficie de ruptura a una velocidad finita, hasta que se detiene. El esfuerzo acumulado se libera completamente al alcanzar una sección más fuerte que la falla o porque se ha llegado al final de la misma. (Chura, 2012, p.14)

En algunas ocasiones, la falla alcanza la superficie y ocasiona cambios importantes del relieve (ver Figura 2.2).



Figura 2.2: Ruptura en superficie que atraviesa la pista atlética de la escuela de Kuangfu, terremoto de Chi-Chi, 1999, Taiwan

Fuente: Adaptado de (Muñoz, 2013, p.9)

2.2.1.3. Sismicidad global

La localización del origen de un sismo se puede estimar por medio de los registros de ondas sísmicas en los diferentes observatorios sismológicos del mundo. Basándose en esta información se ha elaborado mapas con la distribución geográfica de los sismos alrededor de la tierra, como se muestra en la Figura 2.3, en donde se puede observar claramente un cinturón de actividad sísmica separando grandes regiones oceánicas y continentales, con interesantes excepciones en regiones donde los sismos son nulos (Bolt,1999). (Quispe, 2004, p.14)

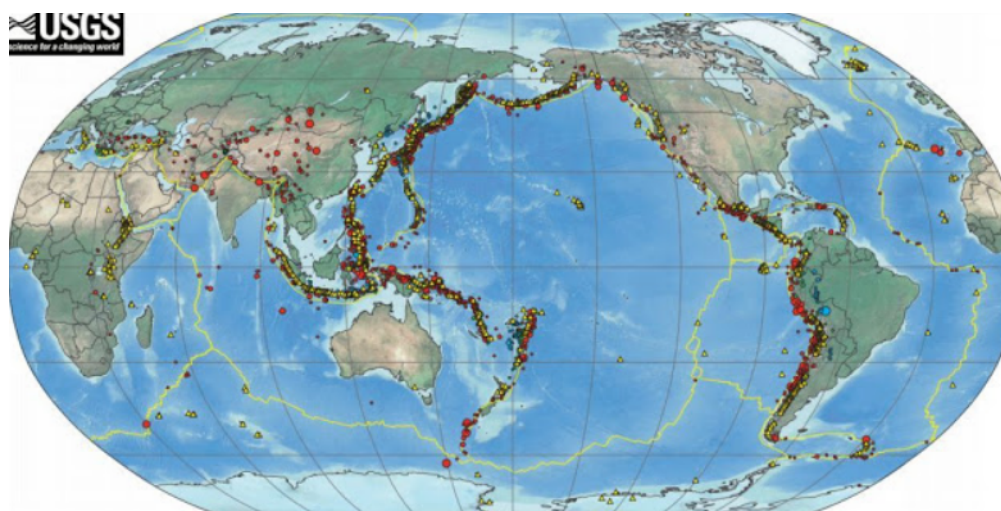


Figura 2.3: Zonas sísmicas en el mundo (1900-2013)

Fuente: Adaptado de USGS

La distribución geográfica de los sismos en el planeta muestra zonas de la tierra con una mayor actividad sísmica, siendo una de estas el denominado cinturón Circum-Pacífico, que comprende toda la parte oeste del continente americano, desde Alaska hasta el sur de Chile y desde la parte norte de las islas Aleutianas, siguiendo por todas las islas del Japón hasta Indonesia y Nueva Zelanda. Otra zona denominada Mediterráneo - Himalaya se extiende desde las islas Azores al sudoeste de la península Ibérica, pasando por Italia, Grecia, Turquía, Persia, llegando hasta el Himalaya y norte de la India y de China. Finalmente la zona que está formado por las cordilleras submarinas que dividen el Atlántico en dos partes, la del Indico y la del Pacífico, frente a las costas occidentales de América del Sur. Los estudios de sismicidad de estas regiones han servido para confirmar la teoría de la tectónica de placas y la formación de los continentes. (Chura, 2012, p.16)

Según esta teoría, la tierra consta de una capa sólida exterior de aproximadamente 100 km. de espesor denominada litosfera, cuya superficie exterior corresponde al fondo marino y a la superficie de los continentes. La litosfera descansa sobre una capa, la astenosfera, que se encuentra en estado de semifusión por las altas temperaturas en el interior de la tierra (ver Figura 2.4). Debido a los gradientes de temperatura en el interior de la tierra, parte del material de la astenosfera se expande y se eleva hasta alcanzar la litosfera, para luego dispersarse horizontalmente dando lugar a las llamadas corrientes de convección en la astenosfera. Estas corrientes arrastran consigo grandes porciones de la litosfera denominadas placas tectónicas, con una velocidad entre 1 y 6 cm. por año. Debido a este movimiento, las placas están en permanente interacción en sus bordes, lo que constituye la causa de casi la totalidad de los terremotos en el planeta. (Muñoz, 2013, p.5)

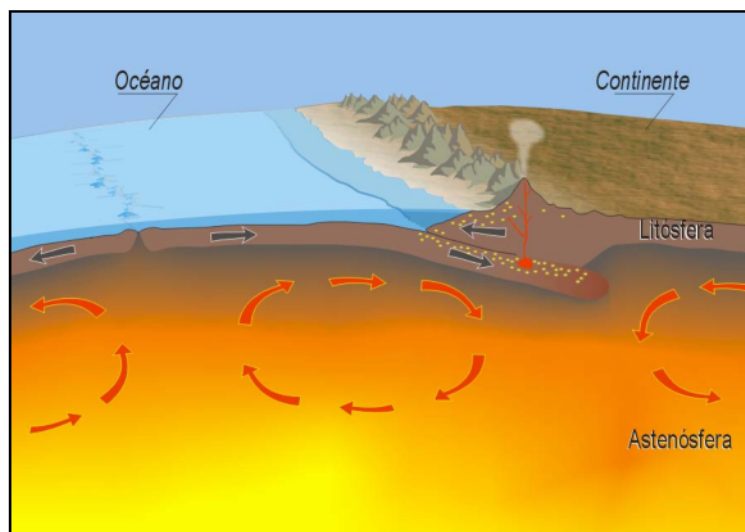


Figura 2.4: Corrientes de convección en la astenósfera - bordes de expansión (izquierda) y subducción (derecha)

Fuente: Adaptado de (Muñoz, 2013, p.5)

Cuando dos placas son arrastradas en sentido contrario, separándose entre sí en el fondo marino, parte del material en fusión alcanza el exterior de la litósfera y se forma nueva corteza. Esta nueva corteza ocupa el lugar dejado por las placas en separación formándose así una cordillera volcánica, denominada dorsal oceánica, que se extiende por miles de kilómetros en el fondo marino. Este tipo de borde entre placas se denomina margen de extensión o divergente (ver Figura 2.5).

Otro tipo de márgenes entre placas es el denominado de subducción; en este caso, las placas tienen un movimiento convergente y una de ellas se introduce por debajo de la otra penetrando en la astenósfera donde vuelve a fundirse, debido a las elevadas temperaturas. La placa que se introduce por debajo corresponde a la litósfera marina, mientras que la otra placa puede ser oceánica o continental. Toda la costa occidental de América del Sur corresponde a un borde de subducción, la placa de Nazca se introduce por debajo de la placa Sudamericana, dando lugar a una de las zonas de mayor sismicidad en el mundo.

Los denominados bordes de colisión corresponden también a un movimiento convergente de dos placas continentales que, por ser de características similares, se comprimen mutuamente sin producirse el buzamiento de alguna de ellas. La placa Indo-Australiana y la placa Euroasiática se juntan en un borde de colisión, fenómeno que ha dado origen a la cadena del Himalaya.

Cuando dos placas se deslizan paralelas al borde y en sentido contrario, se trata de un margen de transformación o fractura. Este tipo de borde une dos márgenes que pueden ser de expansión o subducción y el movimiento relativo horizontal entre placas se transforma, en los extremos del borde, en movimiento de expansión o convergencia; de allí el nombre de borde de transformación. El reconocimiento de este tipo de márgenes permitió explicar el movimiento integral de las placas en relación con sus diferentes bordes. La falla de San Andrés constituye un borde de transformación entre las placas de América del Norte y del Pacífico. (Muñoz, 2013, p.7)

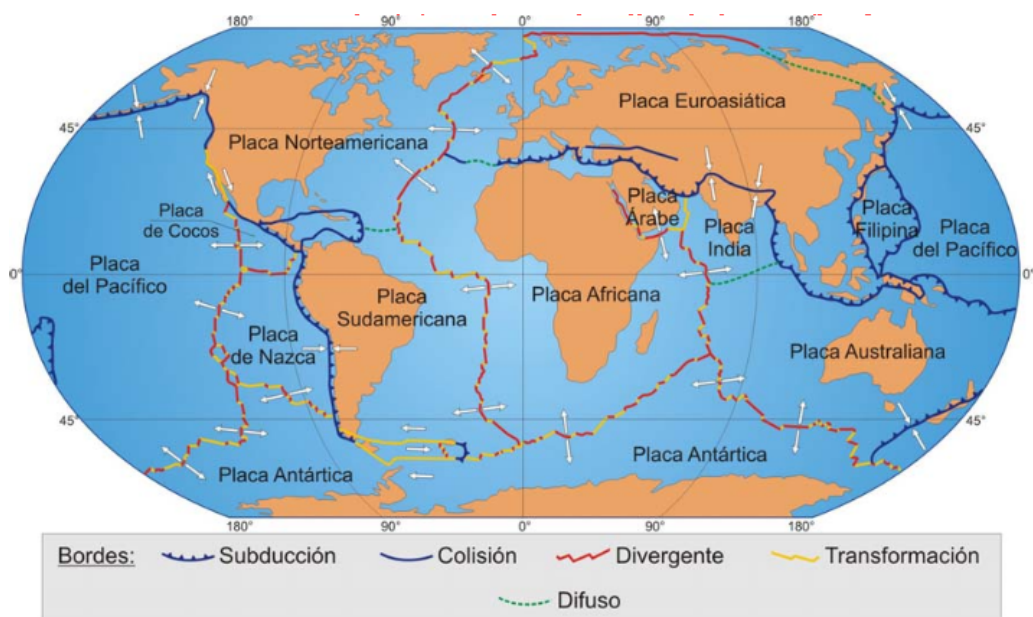


Figura 2.5: Placas tectónicas

Fuente: Adaptado de (Muñoz, 2013, p.6)

2.2.1.4. Sismicidad en el Perú

El borde occidental de América del sur es una de las regiones sísmicamente más activas en el mundo. El Perú forma parte de esta región y su actividad sísmica mas importante esta asociada al proceso de subducción de la placa oceánica (Nazca) bajo la placa continental (Sudamericana), generando terremotos de magnitud elevada con relativa frecuencia. Un segundo tipo de actividad sísmica es producida por las deformaciones corticales presentes a lo largo de la cordillera andina con terremotos menores en magnitud y frecuencia. (Quispe, 2004, p.16)

Tabla 2.1: Parámetros de los principales terremotos históricos que ocurrieron en el Perú entre los años 1513 y 1959

Fecha (dd-mm-aa)	Latitud	Longitud	Intensidad (MM)	Magnitud
22-01-1582	-16.3	-73.3	X	7.9
09-07-1586	-12.2	-77.7	IX	8.1
24-11-1604	-18	-71.5	IX	8.4
14-02-1619	-8	-79.2	IX	7.8
31-05-1650	-13.8	-72	X	7.2
13-11-1655	-12	-77.4	IX	7.4
12-05-1664	-14	-76	X	7.8
20-10-1687	-13	-77.5	IX	8.2
28-10-1746	-11.6	-77.5	X	8.4
13-05-1784	-16.5	-72	X	8
07-12-1806	-12	-78	VIII	7.5
10-07-1821	-16	-73	VIII	7.9
13-08-1868	-18.5	-71.2	X	8.6
09-05-1877	-19.5	-71	VIII	7.5

Fecha (dd-mm-aa)	Latitud	Longitud	Intensidad (MM)	Magnitud
28-07-1913	-17	-73	IX	7
06-08-1913	-17	-74	X	7.7
24-05-1940	-10.5	-77.6	VIII	8.2
24-08-1942	-15	-76	IX	8.4
10-11-1946	-8.3	-77.8	X	7.2
01-11-1947	-11	-75	IX	7.5
21-05-1950	-14.4	-72.1	VII	6
12-12-1953	-3.6	-80.5	VIII	7.7

Fuente: Adaptado de (IGP, 2014, p.13)

Sismicidad histórica

Considera información sobre los grandes sismos que afectaron al territorio peruano en el pasado y ella es importante porque permite definir el real potencial sísmico de cada región. En Perú la información sobre la sismicidad histórica data del año 1500 y la calidad, veracidad de su información dependerá de la distribución y densidad poblacional en las regiones afectadas por los sismos. Para estos eventos se conoce la fecha de ocurrencia, entonces pueden ser utilizados para evaluar la tasa de recurrencia y la sismicidad de una determinada región. La recopilación de esta información fue hecha por (Silgado, 1978) y (Dorbath et al, 1990); siendo mayor para eventos ocurridos frente a la costa peruana con respecto a los que habrían ocurrido en el interior del país (ver Tabla 2.1). (IGP, 2014, p.10)

Según estos autores, los terremotos de mayor magnitud ocurridos frente a la costa son el de 1586 (primer gran terremoto con documentación histórica), 1687 y 1746 que destruyeron en gran porcentaje a la ciudad de Lima, además de producir tsunamis con olas que posiblemente alcanzaron alturas de 15-20 metros. En la región sur, los terremotos más notables fueron los ocurridos en 1604, 1784 y 1868, siendo este último el mejor documentado y descrito en detalle por (Montessus de Ballore, 1911) y (Vargas, 1922). Estos eventos produjeron daños importantes en las ciudades de Arequipa, Moquegua y Tacna; además de Arica e Iquique en Chile. El terremoto de 1868 habría generado tsunami con olas 14 metros de altura afectando a los departamentos de Tacna (Perú), Arica e Iquique (Chile). (IGP, 2014, p.12)

Sismicidad instrumental

La información instrumental contenida en un catálogo sísmico permite identificar y evaluar las características de las fuentes sismogénicas que caracterizan a una región. Desde inicios del siglo XX, esta información cuantitativa ha sido mejorada en paralelo con la evolución de la sismometría y con el incremento del número de estaciones sísmicas. En general, se considera que a partir del año 1960 se disponía, a nivel mundial y regional de un número aceptable de estaciones sísmicas cuya información permitió reducir los errores en el cálculo de los parámetros que caracterizan a un sismo. En el caso del Perú, la base de datos sísmicos para la década de los años 60 proviene del catálogo de la red sísmica mundial (USGS) y a partir de los años 80, con el incremento de estaciones sísmicas operativas en el país permitiendo que la calidad de la información mejore considerablemente. (IGP, 2014, p.12)

El análisis y evaluación de la distribución espacial de los sismos ocurridos en Perú, durante el periodo instrumental, ha sido realizado por diversos investigadores, los resultados obtenidos han permitido determinar las características de la geometría de las principales fuentes

sismogénicas asociados a la deformación cortical y al proceso de subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana. (Chura, 2012, p.21)

Los sismos han sido diferenciados por su rango de profundidad focal en superficiales ($h < 60$ km), intermedios ($61 < h < 350$ km) y profundos ($h > 351$ km).

2.2.1.5. Principales fuentes sismogénicas en el Perú

El borde occidental de América del Sur se caracteriza por ser una de las regiones sísmicamente más activas en el mundo. El Perú forma parte de esta región, esto ha permitido definir la existencia de tres principales fuentes sismogénicas (ver Figura 2.6) (IGP, 2017, p.4):

- La primera y más importante fuente, la constituye la superficie de fricción entre las placas de Nazca y Sudamericana, presente en el borde occidental del Perú. Esta fuente ha dado origen, en el pasado, a los más importantes sismos ($M > 7.0$ Mw), en cuanto a su magnitud, intensidad y niveles de destrucción en superficie. Muchos de estos eventos fueron acompañados de tsunamis que incrementaron el daño, principalmente en zonas costeras.
- La segunda fuente, considera la deformación superficial de la corteza continental con la presencia de fallas geológicas de diversas geometrías y dimensiones. Esta fuente genera sismos de magnitud moderada ($M > 7.0$ Mw), pero estos al ocurrir cerca de las áreas urbanas y ha escasos niveles de profundidad, producen daños y destrucción similar a los grandes sismos con origen en primera fuente sismogénica.
- La tercera fuente, corresponde a la deformación interna de la placa de Nazca por debajo de la cordillera de los Andes a niveles de profundidad del orden de 100 km a más. En general, esta fuente ha dado origen a sismos de magnitudes moderadas que han producido en superficie procesos de licuación de suelos en los valles de las zonas andinas y subandinas ($M < 7.0$ Mw).

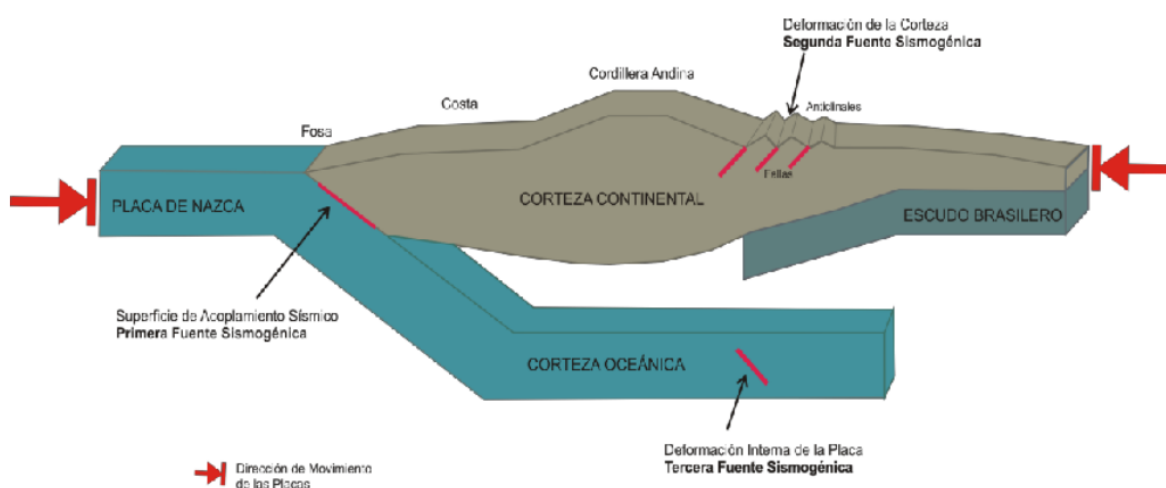


Figura 2.6: Esquema que muestra la geometría de subducción y las principales fuentes sismogénicas del Perú

Fuente: Adaptado de (IGP, 2017, p.4)

2.2.2. Evaluación de la sismicidad

2.2.2.1. Intensidad

La intensidad mide el impacto de un sismo en un punto dado, dependerá de la magnitud del evento como de la distancia del sitio al lugar del origen del evento, de la geología local y de las características del suelo. (Muñoz, 2013, p.18)

Los resultados de toda evaluación de peligro sísmico dependen del parámetro de intensidad que representa el movimiento, considerando ello estas pueden expresarse en términos cualitativos o cuantitativos.

Las escalas más utilizadas para medir la intensidad sísmica de manera cualitativa son la Mercalli Modificada (MM) y la MSK, los cuales se definen en términos cualitativos, dependiendo de una descripción del daño asociado. La primera fue propuesta por Mercalli en 1902 y modificada por Wood y Newman en 1931 y Richter en 1956. La segunda se debe a los trabajos de Medvedev, Sponheuer y Karnik en 1967. Ambas escalas tienen XII grados y son muy similares, siendo la primera más utilizada en América y la segunda en Europa. (Sarachaga, 1997, p.54)

Los primeros grados de estas escalas se definen en función del nivel de percepción en las personas y por los efectos en el mobiliario. Los grados intermedios se determinan tanto por el nivel de daño causado en las obras civiles como por las alteraciones en la superficie. Los grados altos corresponden fundamentalmente a cambios severos en la naturaleza. Debido a que los primeros grados de la escala de intensidades tienen mucho que ver con el nivel de percepción humana y los grados intermedios con la evaluación de daños en las edificaciones, se puede afirmar que la determinación de la intensidad resulta en cierta medida subjetiva. Por otro lado, el hecho que las edificaciones modernas tengan en general una resistencia sísmica mayor que las edificaciones de décadas pasadas, complica aún más la determinación de los valores de Intensidad. Pese a todo esto, la intensidad nos permite cuantificar de manera sencilla la severidad del movimiento y establecer comparaciones entre diferentes puntos de una región afectada, o entre los efectos de diferentes sismos en un lugar determinado. (Muñoz, 2013, p.18)

En la actualidad una serie de medidas de intensidad más técnicas se han propuesto en la literatura como mediciones cuantitativas de la severidad del movimiento y como indicadores que se pueden relacionar con el potencial de daño. Dado que los parámetros inherentes al movimiento son el desplazamiento, la velocidad y la aceleración, el peligro sísmico es a menudo estimado en función de los valores máximos de estos parámetros, denominados habitualmente PGD, PGV y PGA. Sin embargo, estos parámetros no tienen en cuenta el contenido frecuencial del movimiento y es independiente de la duración de la sacudida, que puede ser determinante de la respuesta dinámica de la estructura. Por ello, cobran cada vez más importancia los estudios de peligrosidad en términos de ordenadas espectrales de aceleración, $SA(w)$, velocidad, $SV(w)$, y desplazamiento, $SD(w)$, para diferentes frecuencias del movimiento. (Benito y Cabañas, 1999, pp.14,41)

La descripción de la intensidad no siempre puede lograrse con un único parámetro, sin embargo, para fines prácticos se considera adecuado utilizar el parámetro que más influencia tenga sobre el daño en las estructuras (Meli *et al.*, 2005, pp.11,12). Para el caso del riesgo sísmico de edificaciones la intensidad que mejor se adapta para la definición de la amenaza es la cantidad denominada Aceleración Espectral, S_a , la cual se correlaciona bastante bien con

el daño en las estructuras (ERN, 2010).

2.2.2.2. Magnitud

La magnitud es un parámetro que mide el tamaño de un sismo. A diferencia de la intensidad, es una medida instrumental que se relaciona con la energía sísmica liberada en el foco y transmitida por ondas sísmicas. La magnitud es una constante que no depende del lugar de observación. Como mide la energía transmitida por las ondas sísmicas, este parámetro, en sus diferentes escalas, se relaciona directa o indirectamente con las amplitudes de las fases registradas. (Sarachaga, 1997, p.58)

Richter propuso en 1935, expresar la magnitud M de los terremotos en el Sur de California, en función de la amplitud del desplazamiento (A_d en micrones) registrado a 100 Km. del epicentro por un sismómetro Wood-Anderson. Para permitir mediciones a otras distancias, Richter agregó un término de corrección A_0 según la siguiente expresión:

$$M = \log(A_d) - \log(A_0)$$

La magnitud de Richter solo puede emplearse para terremotos cercanos, por lo que se conoce como Magnitud Local M_L . Para sismos lejanos, se debe precisar el tipo de onda que se emplea al establecer la magnitud. Si se usan las ondas de superficie la magnitud se denota por M_S y si se usan las ondas de cuerpo, generalmente P , la magnitud se representa por m_b . La magnitud M_S se determina en función de la amplitud A y la distancia al foco R_c , medida en grados latitud longitud, como:

$$M_S = \log(A) + 1.66R_c + 2$$

Se han desarrollado correlaciones empíricas entre escalas como la siguiente:

$$m_b = 2.5 + 0.63M_S$$

Para sismos grandes, las escalas anteriores se saturan y no permiten comparar adecuadamente los tamaños de los terremotos. Las escalas m_b y M_S se saturan alrededor de 6.5 y 8.5, respectivamente.

Como medida del tamaño de un terremoto, se ha propuesto también el momento sísmico M_{ts} , que se determina a partir del área de ruptura S , el desplazamiento de la falla (Δ) y el módulo de rigidez de la roca G , como:

$$M_{ts} = S\Delta G$$

En 1977, Kanamori propuso la escala M_W empleando el valor del momento sísmico en dinas-cm, mediante la siguiente expresión:

$$M_W = (2/3) \log M_{ts} - 10.7$$

Esta escala tiene la ventaja que no se satura y permite establecer diferencias entre terremotos con valores M_S o m_b cercanos. La Figura 2.7 presenta una relación propuesta para las magnitudes M_W , M_S y m_b .

La energía liberada durante un terremoto (E , en ergios) puede estimarse en función de la magnitud M_S , como:

$$\log E = 11.8 + 1.5M_S$$

y para las magnitudes obtenidas en función de las ondas de cuerpo (mb), como:

$$\log E = 5.8 + 2.4mb$$

Es importante notar que, entre dos grados consecutivos de la escala M_S , la energía crece en 32 veces ($10^{1.5} \approx 32$), y para las escalas que emplean las ondas de cuerpo, la energía crece en 251 veces ($10^{2.4} \approx 251$). (Muñoz, 2013, pp.22,23)

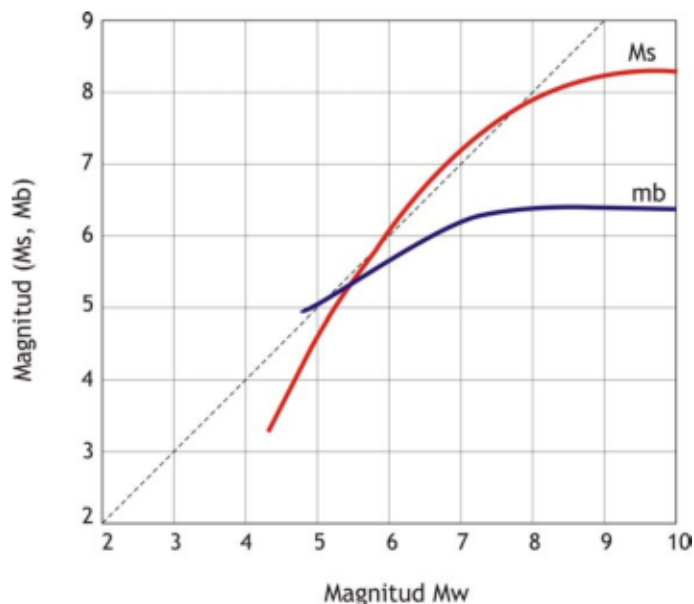


Figura 2.7: Relación entre valores de magnitud Mw, Ms y mb (Idriss,1985)

Fuente: Adaptado de (Muñoz, 2013, p.23)

2.2.3. Vulnerabilidad sísmica

Como menciona (Palomino y Tamayo, 2016, pp.43,44) 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. 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. 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.

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 y Elnashai, 2003; Calvi, et al., 2006):

- Modelos empíricos, basados en observaciones del comportamiento de componentes o estructuras durante eventos de intensidad conocida o estimada.

- Modelos analíticos, desarrollados con base en información teórica o experimental del comportamiento estructural de edificios.
- Modelos basados en opinión de expertos, desarrollados cuando no se dispone de modelos analíticos ni empíricos.

Dentro de esta clasificación, se puede mencionar que los modelos analíticos (por ejemplo, Rossetto y Elnashai, 2005) son comúnmente comparados y calibrados con modelos empíricos (Rossetto y Elnashai, 2003). También existen modelos denominados híbridos, que se construyen utilizando datos empíricos y la información faltante es completada a partir de modelos analíticos.

2.2.4. Daño sísmico

El daño es el grado de degradación o destrucción causado por un evento sísmico sobre las personas, los bienes, los sistemas de prestación de servicios y los sistemas naturales o sociales. (Bonett Díaz, 2003, p.19)

Según (Quispe, 2004, p.30) el daño es un fenómeno que afecta a cualquier tipo de estructura, sin embargo, a partir de ahora se hará referencia únicamente al daño que puede sufrir las edificaciones, por ser parte del objetivo de esta investigación. Para esto se clasificará el daño en tres grupos principales:

2.2.4.1. Daño estructural

Es evidente que el daño estructural es el de mayor importancia, ya que éste puede ocasionar que una estructura colapse o, en el mejor de los casos, que su reparación pueda ser muy costosa. El daño estructural depende del comportamiento de los elementos resistentes de una estructura como son las vigas, columnas, muros de carga, sistema de piso, y esto tiene que ver con la calidad de los materiales que componen dichos elementos, su configuración y tipo de sistema resistente y, obviamente, de las características de las cargas actuantes.

2.2.4.2. Daño no estructural

Este tipo de daño está asociado principalmente a elementos que no forman parte del sistema resistente, como pueden ser muros divisorios, ventanales, revestimientos, etc. Sin embargo, a pesar de que este tipo de daño no pone en peligro el comportamiento de la estructura, si es causa de un incremento considerable en las pérdidas económicas.

2.2.4.3. Daño económico

Es una forma de relacionar el índice de daño estructural con las pérdidas económicas de un edificio debido a un sismo. Para esto se necesita evaluar el índice de daño global en términos de costes financieros, es decir, se requiere conocer un índice de daño económico global de la estructura, que agrupe los índices anteriores. Generalmente se define de la siguiente manera:

$$\text{Índice de daño económico} = \frac{\text{Costo de reparación del daño}}{\text{Costo de reposición}}$$

En donde, el costo de reparación es una suma ponderada de los costos parciales de reparación, tanto de los elementos estructurales como no estructurales, por lo que se deben relacionar los costos con los indicadores de daño.

2.2.5. Riesgo sísmico

El riesgo sísmico es definido como la probabilidad de experimentar daños o pérdidas de determinado nivel, en un período de tiempo determinado. Esta definición técnica del riesgo remite necesariamente a modelos probabilistas de amenaza sísmica y del comportamiento de las construcciones. Es común representar el riesgo sísmico mediante la Ecuación 2.2.1. (Cardona, 2001)

$$R = V * P * M_t \quad (2.2.1)$$

Donde R representa al riesgo sísmico, P representa el peligro o la amenaza sísmica, V es la vulnerabilidad de las construcciones, y M_t es el valor monetario de los bienes para los cuales se estima el riesgo.

Esta forma de representar el riesgo es ilustrativa en el sentido de que refleja rápidamente la necesidad de que existan la amenaza, la vulnerabilidad y el monto expuesto para exista el riesgo. Por ejemplo, un bien o edificio tiene intrínsecamente una vulnerabilidad y un valor expuesto, pero si la amenaza es nula, el riesgo también lo será. Igualmente, si existe peligro, existe una construcción, pero la vulnerabilidad es nula, entonces el riesgo es nulo. Lo mismo ocurre en bienes que tienen valores nulos.

En realidad, la estimación es bastante mas compleja que la fórmula indicada en la Ecuación 2.2.1, debido a que los factores que intervienen provienen de una modelación rigurosa por lo que la estimación del riesgo se realiza mediante medidas que se detallan en la Sección 3.7.5.

2.2.6. Enfoque evaluación probabilista de riesgo con CAPRAGIS

La metodología CAPRA fue desarrollada por el Consorcio Evaluación de Riesgos naturales de América Latina (ERN AL) para el Banco Mundial (BM), el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y la Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres (ISDR) de las Naciones Unidas, fue concebida como un modelo de código abierto para diferentes actividades de gestión de riesgos de desastres. Esta iniciativa comprende un marco conceptual, un software modular (CAPRAGIS) para calcular riesgos, herramientas de análisis, así como un proceso de capacitación que crea y permite un entorno para la integración de la reducción del riesgo de desastres. 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. El enfoque integral de la evaluación probabilística de riesgos es útil para la toma de decisiones de gestión de riesgos y utiliza una metodología y herramientas comunes para evaluar y representar el riesgo de desastres. CAPRA ha sido utilizado en Colombia, México, Perú, Bolivia, Ecuador, Guyana, Jamaica, los países de Centro América, España, Nepal y sus experiencias son una contribución para el actual desarrollo del Global Earthquake Model (GEM). A la fecha es empleado en la modelación probabilista de riesgo sísmico, priorización de intervenciones de reducción de riesgo sísmico, riesgo de tsunami inducido por sismos, entre otros usos; tanto a nivel local como regional; y en sectores como vivienda, educación, transporte, entre otros. (ERN, 2010; Cardona *et al.*, 2011; Cardona *et al.*, 2012; Marulanda *et al.*, 2013; Salgado *et al.*, 2014)

La evaluación probabilista de riesgo empleando CAPRAGIS requiere que se cuente con información previa de tres componentes: la amenaza, la exposición y la vulnerabilidad, que se describen a continuación.

1. **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.
2. **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 el elemento:
 - Valor físico o costo de reposición del bien.
 - Valor humano o número de ocupantes estimado.
 - estructural a la que pertenece el bien.
3. **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 daños 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 2.8 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 terremotos, 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. (Palomino y Tamayo, 2016, p.16)

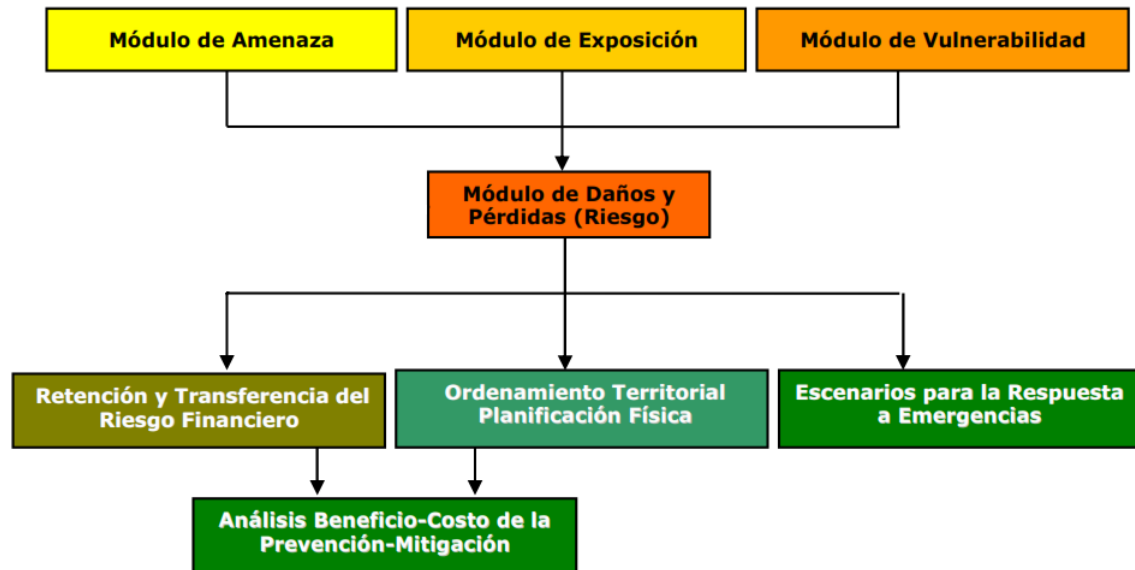


Figura 2.8: Modelo probabilista de riesgo y algunas aplicaciones

Fuente: Adaptado de (ERN, 2010)

Capítulo 3

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Enfoque

El presente trabajo de tesis desarrolla un enfoque cuantitativo ya que emplea la recolección de datos (amenaza, vulnerabilidad y exposición) para determinar el riesgo sísmico, con base en la medición numérica y el análisis estadístico.

3.2. Alcance

El alcance de la investigación es de tipo descriptivo ya que busca dimensionar, describir un fenómeno (riesgo sísmico), a partir de la recolección de información de manera independiente sobre conceptos y variables que intervienen en el proceso (amenaza, vulnerabilidad y exposición).

3.3. Diseño de investigación

El diseño de la investigación es no experimental ya que se realizan sin la manipulación deliberada de variables. Es decir se eligen valores ya establecidos de amenaza, vulnerabilidad y exposición, para posteriormente emplearlos en la determinación de riesgo sísmico.

3.4. Población y muestra

3.4.1. Población

Se tiene una población que considera todas las construcciones destinadas a vivienda en el distrito de Ayacucho en el año 2018.

3.4.2. Muestra

La muestra de la presente investigación esta conformado por la misma población, y está constituida por 15974 edificaciones, de los cuales 10282 corresponden a viviendas de ladrillo entre 1 a 6 pisos y 5692 son de adobe y tapial entre 1 a 2 pisos.

La elección de la muestra consideró un procedimiento no probabilista por conveniencia, dado que se consiguió información de las distintas construcciones, así como información de microzonificación sísmica del distrito de Ayacucho.

3.5. Operacionalización de variables, definición conceptual y operacional

Tabla 3.1: Operacionalización de variables identificadas

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Indicadores	Valor final	Tipo de variable
Vulnerabilidad	Se define como la predisposición o susceptibilidad de un sistema a sufrir daño ante la ocurrencia de un peligro. Ésta puede entenderse como una característica intrínseca del edificio o estructura, que depende únicamente de sus características de diseño y construcción.	Se definieron funciones de vulnerabilidad para cada tipología estructural sustentada en la base de datos de vivienda con base en el número de pisos, el sistema estructural y factores agravantes como la falta de supervisión técnica.	Porcentaje de daño	% de daño	Numérica Continua
Exposición	La exposición se refiere a los componentes de infraestructura o a la población susceptible a sufrir daño o afectación por los peligros considerados, en este caso sismos.	Se definieron el inventario de elementos expuestos, el cual debe especificar la localización geográfica del bien expuesto mas los siguientes parámetros que califican al elemento.	Valor de reposición Tipo estructural NSE Número de pisos	S/. Albañilería y adobe Alto, medio y bajo 1 – 7	Numérica Continua Categorica Nominal Categorica Ordinal Numérica Discreta
Peligro sísmico	Es una medida cuantitativa de la amenaza que los sismos representan en un determinado lugar.	Con base al modelo de sismicidad del IGP, se generaron un conjunto de eventos, con sus respectivas frecuencias de ocurrencia, que representan de manera integral la amenaza correspondiente.	PGA y Sa	cm/s^2	Numérica Continua
Riesgo sísmico	Es la pérdida esperada por una estructura o grupo de estructuras en riesgo, durante un periodo de tiempo. El riesgo representa pérdidas de vidas, heridos y pérdidas de inversiones de capital.	Empleando el software CAPRAGIS y con base en los modelos de amenaza, el inventario de activos expuestos y las funciones de vulnerabilidad correspondientes, se desarrolla un modelo de análisis de riesgo en una zona de estudio determinada.	PAE, PML y ESL	S/.	Numérica Continua

Dado que se trata de una investigación de nivel descriptivo la variable de interés es el riesgo sísmico, las variables de caracterización son la vulnerabilidad, exposición y peligro sísmico

3.6. Técnicas e instrumentos

3.6.1. Técnicas

Análisis documental La recolección de datos es retrospectivo por que está formado por información ya registrada o medida. La presente investigación recogió información de amenaza sísmica elaborada por el Instituto Geofísico del Perú (IGP), información de microzonificación sísmica de estudios previos, así como datos de las infraestructuras para vivienda en la ciudad de Ayacucho. También se recogió información de estudios previos en la literatura para establecer funciones de vulnerabilidad sísmica a cada tipología constructiva.

3.6.2. Instrumentos utilizados

1. Tratamiento de información y exposición.

- AUTOCAD 2015
- ARCGIS V10.2
- Microsoft Office Excel 2010

2. Modelo de amenaza sísmica

- CRISIS 2007 V7.6
- Efectos de Sitio V1.0

3. Evaluación de riesgo sísmico

- CAPRAGIS

4. Edición de texto

- T_EXstudio V2.12.4
- L_AT_EX

3.7. Desarrollo del trabajo de tesis

En esta sección se muestra el procedimiento seguido para la evaluación del riesgo sísmico de viviendas en la ciudad de Ayacucho 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 a partir de estudios de reevaluación de peligro sísmico realizado por el Instituto Geofísico del Perú (IGP) en el año 2014. 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).

La evaluación probabilista de riesgo se realizó utilizando los diferentes módulos de la plataforma CAPRA. Para el cálculo de la amenaza se utilizó el programa CRISIS2007 V7.6

(Ordaz, Aguilar y Arboleda, 2007). La vulnerabilidad sísmica se realizó según la metodología y formatos CAPRA, así como para el cálculo del riesgo se utilizó el módulo CAPRAGIS que integra dichos componentes. Para la estimación de las pérdidas físicas asociadas a cada edificación se requiere de su identificación y caracterización en términos de sistema estructural, edad y valor de reposición.

3.7.1. Caso de estudio

El área de estudio, distrito de Ayacucho, es uno de los dieciséis distritos que conforman la Provincia de Huamanga, ubicada en el Departamento de Ayacucho, siendo el distrito de Ayacucho, la capital de la región la que ha cobrado mayor importancia por ser el centro administrativo regional. El distrito de Ayacucho cuenta con una población de 100,935 habitantes y tiene una extensión de 85.23 Km² (INEI, 2008). La ubicación del distrito es mostrada en la Figura 3.1.



Figura 3.1: Ubicación del distrito de Ayacucho

Fuente: Propia

Aunque el área metropolitana de Ayacucho incluye 5 distritos urbanos, este estudio se enfocó solo en el área urbana del distrito de Ayacucho, cuyo área de estudio se encuentra disectada por el curso principal del río Alameda; que cruza prácticamente por el centro y a lo largo de la ciudad de Ayacucho. Al río Alameda se van integrando a lo largo de su recorrido diversas quebradas afluentes, de entre las cuales destacan por su magnitud y sobre la margen izquierda: quebrada Huascaura, quebrada Puracuti, quebrada Accohuaycco y otras menores que tienen su origen principal en las laderas del cerro denominado “La Picota”, ubicado al

noroeste de la ciudad de Ayacucho; y por la margen derecha la quebrada Chaquiwaycco.

Según el estudio mapa de peligros de la ciudad de Ayacucho (INDECI, 2003), la ciudad de Ayacucho en términos generales presenta peligros de origen geológico, geológico-climático, geotécnico y climático, de calificación baja a media con capacidad de desarrollar zonas urbanas de alta densidad, a excepción de las laderas medias a altas del cerro “La Picota” en donde la alta incidencia de los fenómenos climáticos, geológicos y geológico-climáticos hace que sea una zona peligrosa y que se requieran los estudios detallados del caso para desarrollar zonas urbanas de baja densidad.

Para el presente estudio se logró obtener una base de datos de estructuras en Sistema de Información Geográfica (SIG) con información geográfica y tabular, cuantitativa y cualitativa con un nivel de detalle lote a lote, logrando un nivel de alta precisión de datos. En la investigación se evaluaron únicamente edificaciones del sector residencial. No fueron incluidos edificaciones del sector salud, educación, gobierno, etc.

3.7.2. Evaluación de la amenaza sísmica

En esta sección se describe la evaluación probabilista del peligro sísmico del Perú desarrollada por el Instituto Geofísico del Perú en el año 2014 (IGP, 2014), debido a que es este el modelo de sismicidad adoptado para caracterizar el módulo amenaza en la presente investigación. Para el cálculo del peligro sísmico se usó del algoritmo CRISIS 2007 (Ordaz *et al.*, 2007). 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 la Norma E.30 Diseño Sismorresistente, publicado por SENCICO el año 2016 (SENCICO NTE E.030, 2016).

El estudio de peligro sísmico realizado por el IGP presenta un enfoque de tipo probabilista, debido a que este permite integrar de manera racional las incertidumbres que existen en las diferentes partes del proceso. El Análisis Probabilista de Peligro Sísmico (PSHA, por sus siglas en inglés) se obtiene siguiendo la metodología propuesta y desarrollada por (Esteva, 1968), (Cornell, 1968) el cual considera los siguientes pasos (ver Figura 3.2):

1. Identificación y caracterización de fuentes sísmicas.
2. Caracterización de la distribución temporal de recurrencia de sismos.
3. Definición de las ecuaciones de predicción de movimiento del suelo (GMPE).
4. Cálculo de la probabilidad de excedencia del parámetro utilizado para medir el movimiento sísmico durante un determinado periodo de tiempo

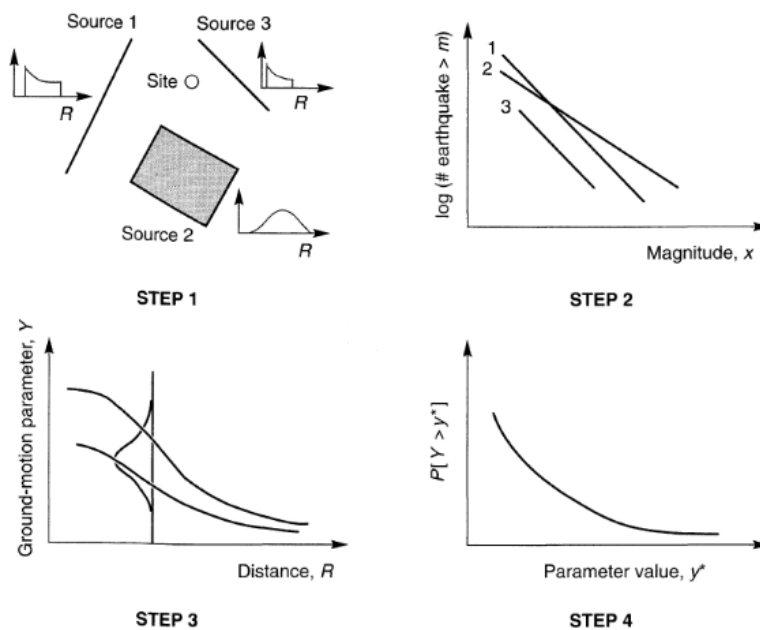


Figura 3.2: Los cuatro pasos de un PSHA

Fuente: Adaptado de (Kramer, 1996, p.118)

3.7.2.1. Definición y caracterización de principales fuentes sísmogénicas

Al estudiar la sismicidad de una región amplia, se observa que, además de los hipocentros, los parámetros característicos empleados para definir la sismicidad varían con la subregión de corteza que se estudia. Por esto, es necesario identificar volúmenes corticales con similar densidad de hipocentros y características homogéneas de sismicidad. Estos volúmenes se denominan fuentes sísmogénicas de volumen. (Muñoz, 2013, p.33)

El IGP definió las fuentes sísmogénicas analizando la configuración tectónica y la sismicidad del Perú, el cual agrupa la actividad sísmica de país en 33 fuentes (ver Figuras 3.3 y 3.4). Dichas fuentes están modeladas con superficies planas, inclinadas, con profundidades que varían desde 30 hasta 200 km. Las fuentes concuerdan razonablemente con la actividad sísmica en el país, la cual fue registrada desde 1960 hasta 2012, ello supone un avance importante respecto a otros estudios de amenaza sísmica como el de (Castillo y Alva, 2009) y el (Gamarra y Aguilar, 2009). El estudio de Castillo y Alva definió 20 fuentes sísmicas empleando una data sísmica desde 1900 hasta 1991. Gamarra y Aguilar tomó parte de las fuentes identificados por Castillo, estas se reagruparon y también generaron 20 fuentes sísmicas con base una data comprendida entre 1900 y 2008.

Para la delimitación de las fuentes sísmogénicas en el Perú, el IGP analizó y evaluó la distribución espacial de la sismicidad asociada al proceso de la subducción y deformación cortical, esto es muy importante a saber pues dependiendo del tipo de fuente que este sea se le asignara determinados parámetros relacionados a la sismicidad, así como sus respectivas funciones de atenuación para cada fuente.

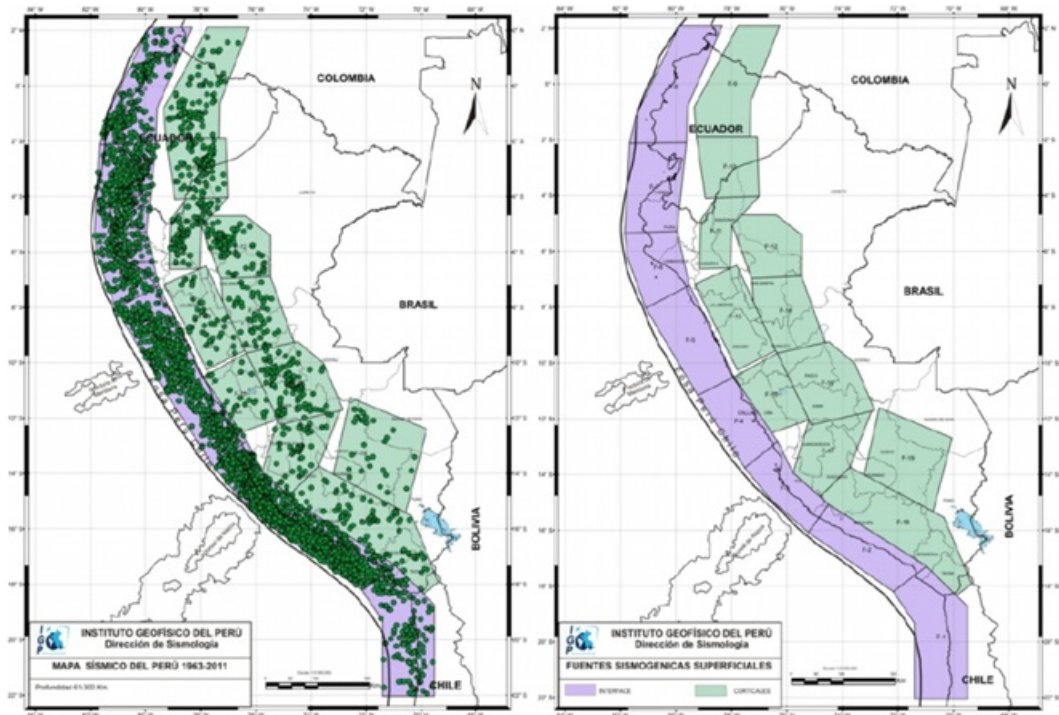


Figura 3.3: Fuentes de subducción tipo interplaca y asociadas a deformación cortical

Fuente: Adaptado de (IGP, 2014, p.18)

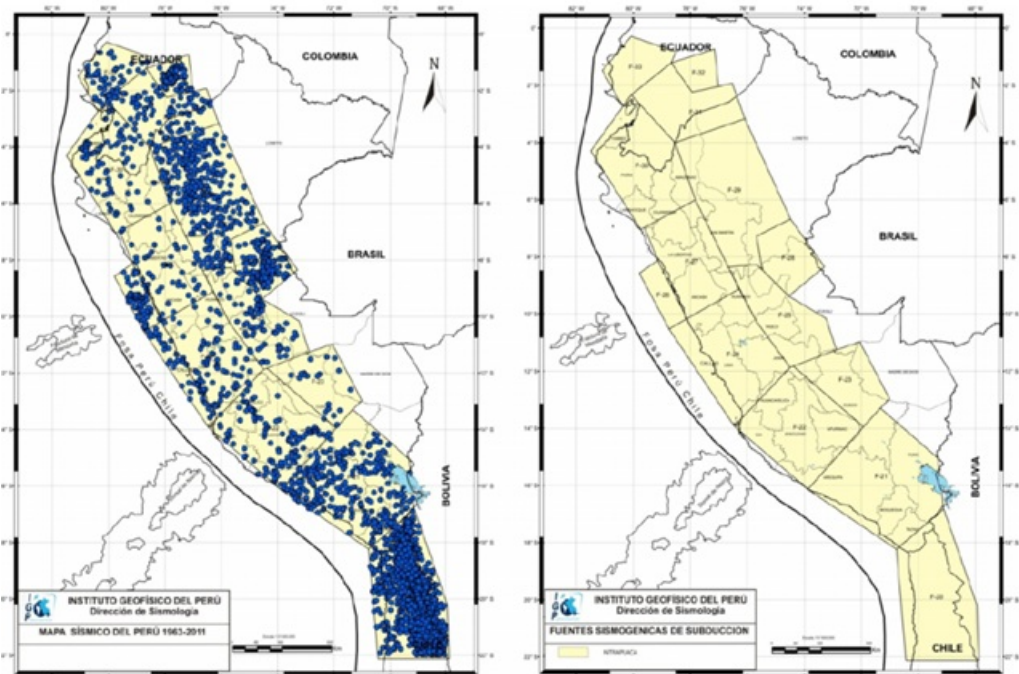


Figura 3.4: Fuentes de sismicidad intraplaca.

Fuente: Adaptado de (IGP, 2014, p.19)

Debido a la distribución espacial de la sismicidad las fuentes empleadas en el estudio se dividen en tres grupos importantes las fuentes como F-1 hasta la F-8 representan a la sismicidad de subducción tipo interplaca. Las fuentes F-9 hasta la F-19 corresponden a las fuentes asociadas a la deformación cortical presente en el interior de la placa continental. Las fuentes F-20 hasta la F-33 consideran a la sismicidad intraplaca o deformación interna de la placa de Nazca por debajo del continente. Las coordenadas de las fuentes sismogénicas que se emplearon en la presente investigación se presentan en la Tabla A.1 del Anexo A.

Por lo general, 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 un procedimiento que tome en cuenta la distribución homogénea de la sismicidad en toda la fuente. 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. El programa CRISIS2007 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. (Palomino y Tamayo, 2016, pp.24,25)

3.7.2.2. Recurrencia sísmica

La sismicidad en cada fuente queda definida por su ecuación de recurrencia, el cual cuantifica al número de eventos mayores o iguales a una determina magnitud en un periodo de tiempo, Para caracterizar la recurrencia de magnitudes de las fuentes sísmicas en el territorio peruano (Muñoz, 2013, p.33), el IGP propone utilizar el modelo de Gutenberg y Richter modificado, dado por la Ecuación 3.7.1.

$$\lambda(M) = \lambda_0 \frac{e^{-\beta M} - e^{-\beta M_u}}{e^{-\beta M_0} - e^{-\beta M_u}} \rightarrow M_0 \leq M \leq M_u \quad (3.7.1)$$

Donde: M es la magnitud del evento, $\lambda(M)$ es la tasa anual de excedencia correspondiente a la magnitud M , λ_0 es la tasa anual de ocurrencia de eventos en la fuente, β es un parámetro de sismicidad, M_0 es la mínima magnitud a considerar en el análisis, M_u es la máxima magnitud en la fuente.

Respecto de M_u , la máxima magnitud de la fuente, se le debe considerar una variable aleatoria que tiene una distribución de probabilidad cerrada entre dos valores, el límite inferior M_1 y el límite superior M_2 , y que tiene un valor esperado igual a $E[M_u]$.

La determinación de los parámetros λ_0 , β , M_0 y M_u se realiza mediante análisis de regresión de datos. El IGP realizó la estimación de los parámetros empleando el catálogo de sismos desde 1960 y complementándolo con los grandes sismos históricos documentados. Los datos relevantes para este cálculo son la magnitud del evento, y la fecha de ocurrencia, los parámetros obtenidos por el IGP se presentan en la Tabla A.2 del Anexo A.

El programa utilizado, CRISIS2007 subdivide o discretiza el rango de magnitudes (desde M_0 hasta M) 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 (ver Figura 3.5). A partir del número de fuentes (N_f), subfuentes (P_f) y magnitudes (Q_f), se puede establecer el número de escenarios que tendrá el mapa de amenaza que se exportará a CAPRAGIS para el cálculo de riesgo sísmico (ver Ecuación 3.7.2) (Palomino y Tamayo, 2016, p.26).

$$\text{Número de Escenarios Sísmicos} = N_f \times P_f \times Q_f \quad (3.7.2)$$

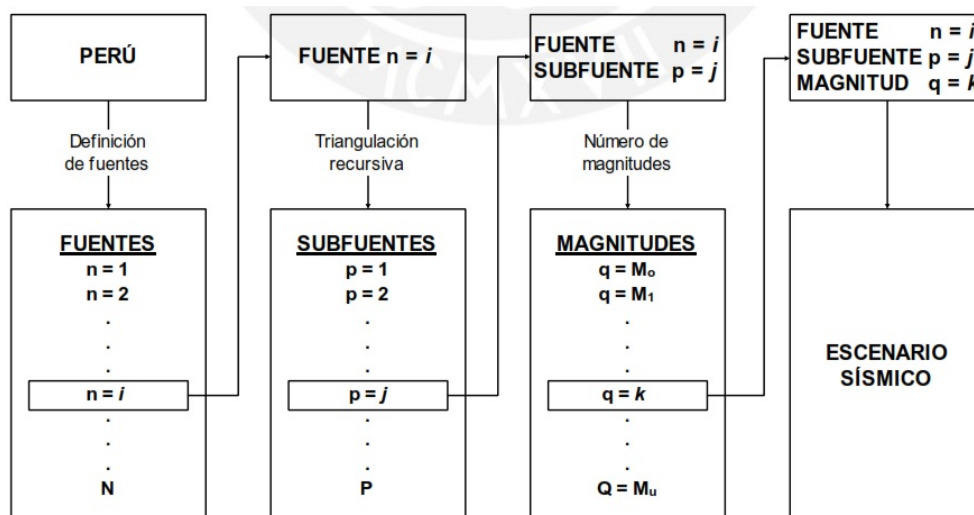


Figura 3.5: Definición de escenario sísmico.

Fuente: Adaptado de (Palomino y Tamayo, 2016, p.26)

3.7.2.3. Leyes de atenuación

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 iésima fuente ocurriera un sismo con una magnitud dada. A las expresiones que permiten estimar la intensidad sísmica a partir de la distancia foco o al epicentro, la magnitud del evento y el tipo de suelo les conoce como leyes de atenuación o Ecuaciones de Predicción de Movimiento del suelo (GMPE, por sus siglas en inglés). (ERN, 2010)

Con base en estudios previos y el estado de arte actual, el IGP utilizó GMPE de Youngs para fuentes de subducción y Sadigh para fuentes corticales, dado que han sido empleadas en diversos estudios de amenaza realizados para el país debido a que son los que mejor pueden caracterizar la pérdida de intensidad de los sismos de esta región. De hecho, en la determinación de GMPE de Youngs se consideraron muchos sismos registrados en Sudamérica. Por su parte, la ley de atenuación de Sadigh es una de las pocas leyes desarrolladas para sismos corticales.

En la presente investigación se requiere que la amenaza sísmica esté expresada en términos de Aceleración Máxima del terreno (PGA, por sus siglas en inglés), así también expresada en pseudoaceleraciones espectrales (S_a) para diferentes periodos de vibración; por lo que emplearon GMPE espectrales en el dominio de ambas intensidades sísmicas de interés. Con ello,

es posible calcular el espectro de respuesta (ordenadas espectrales para diferentes periodos de vibración), dadas una magnitud y una distancia.

$$Ln(Sa) = 0.32418 + 1.414M + C_1 + C_2(10 - M)^3 + C_3Ln(r_{rup} + 1.7818e^{0.554M}) + 0.00607H_f + 0.3846Zt \quad (3.7.3)$$

$$Ln(Sa) = C_1 + C_2M - C_3Ln(r_{rup} + C_4e^{C_5M}) + C_6 + C_7(8.5 - M)^{2.5} \quad (3.7.4)$$

Las Ecuaciones 3.7.3 y 3.7.4 muestran los GMPE utilizadas por el IGP: Youngs y Sadigh, respectivamente. En las ecuaciones, M es la magnitud momento sísmico, r_{rup} es la distancia en Km más cercana al área de ruptura, H_f es la profundidad focal en km y Zt es 0 para sismos de interfase y es 1 para sismos de intraplaca. Los coeficientes C_i son valores hallados para cada tipo de fuente (estos dependen del tipo de falla, la magnitud y el periodo de vibración que se desea evaluar). 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 Sa dependen del periodo fundamental de vibración estructural y del amortiguamiento estructural.

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_o), y otros factores) (Ordaz, et al., 2000). (ERN, 2010; Palomino y Tamayo, 2016)

3.7.2.4. Cálculo de Amenaza

Una vez conocidas la sismicidad de las fuentes y los GMPE asociada a cada una de ellas, puede calcularse la amenaza sísmica 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 amenaza, expresada en términos de la tasas de excedencia de intensidades \mathbf{a} , se calcula mediante la Ecuación 3.7.5 (Cornell, 1968). (ERN, 2010)

$$v(a) = \sum_{n=1}^{n=N} \int_{M_o}^{M_u} -\frac{d\lambda(M)}{dM} Pr(A > a/M, R_o) dM \quad (3.7.5)$$

Donde la sumatoria abarca la totalidad de las fuentes sísmicas N , y $Pr(A > \mathbf{a}/M, R_o)$ es la probabilidad de que la intensidad sea excedida por un cierto valor, dadas la magnitud del sismo M , y la distancia entre i -ésima fuente y el sitio R_i . Las funciones $\lambda_i(M)$ son las tasas de actividad de las fuentes sísmicas. La integral se realiza desde M_o hasta M_u , lo que indica que se toma en cuenta, para cada fuente sísmica, la contribución de todas las magnitudes.

Dado que se ha definido que la intensidad tiene una distribución lognormal, para una determinada magnitud y distancia, la probabilidad $Pr(A > \mathbf{a}/M, R_o)$ se calcula con la Ecuación 3.7.6. En dicha ecuación $\phi(\cdot)$ es la distribución normal estandar, $E(A/M, R_0)$ el valor esperado del logaritmo de la intensidad (calculado con la GMPE correspondiente) y σ_{Lna} 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 pseudo-aceleraciones para 5% de amortiguamiento crítico y el periodo fundamental de vibración de la edificación de interés, T .

$$\Pr(A > a/M, R_0) = \phi \left(\frac{1}{\sigma_{Lna}} \ln \frac{E(A/M, R_0)}{a} \right) \quad (3.7.6)$$

Las consideraciones anteriores representan la base de la herramienta CRISIS 2007 (Ordaz et al. 2007), con base en ello el IGP obtiene mapas amenaza a nivel nacional, que presentan aceleraciones máximas del suelo (PGA) que tienen una probabilidad del 10% de ser excedidas en 50 años, o, lo que es lo mismo, que tienen un periodo de retorno de 475 años.

3.7.2.5. Algoritmo CRISIS 2007

CRISIS 2007 hace uso del método probabilista para calcular el peligro sísmico conociendo la geometría y parámetros de cada fuente sísmica, y las leyes de atenuación. El peligro sísmico se calcula para varios puntos de una malla definida de acuerdo al área de estudio. Para ello cuenta con entorno gráfico, que con ayuda de ventanas de dialogo, facilita el procesamiento de los datos y el cálculo del peligro sísmico.

Las etapas principales para crear un modelo de peligro sísmico probabilista empleando CRISIS 2007 se describen a continuación.

- **Definición y caracterización de principales fuentes sismogénicas.**

Una vez definidas y caracterizadas las fuentes sísmicas, se procedió a especificar las coordenadas geográficas de los vértices, así como la profundidad de las 33 fuentes sísmicas (ver Figura 3.6), para ello se emplearon los valores de la Tabla A.1 del Anexo A (IGP, 2014).

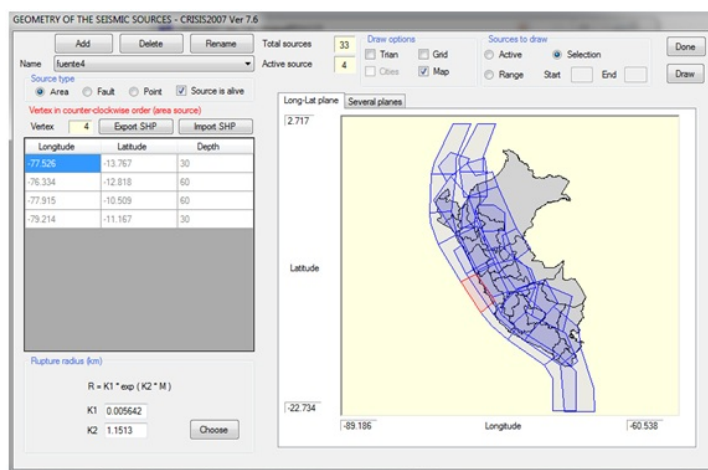


Figura 3.6: Determinación de fuentes sísmicas en CRISIS 2007. (Fuente 4/Tipo Subducción interplaca)

Fuente: Propia

- **Asignación de parámetros de sismicidad a las diferentes fuentes sísmicas.**

Se asignaron los parámetros de sismicidad a cada fuente sismogénica, todos definidos a partir de la curva de recurrencia sísmica de cada fuente sismogénica (Gutenberg y Richter, 1956) de acuerdo al proceso de Poisson. Para ello se emplearon los valores de la Tabla A.2 del Anexo A (IGP, 2014). (ver Figura 3.7)

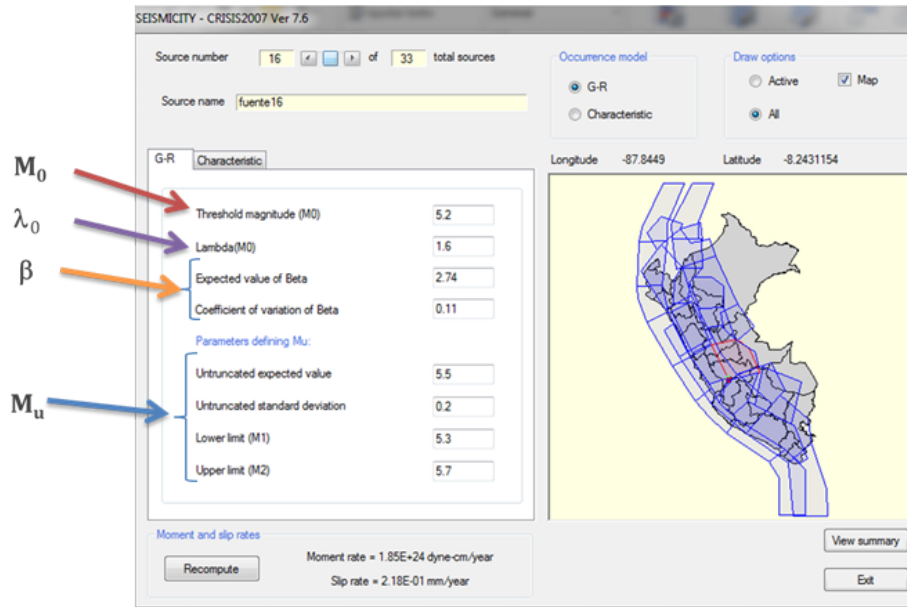


Figura 3.7: Asignación de parámetros de sismicidad en CRISIS 2007. (Fuente 16/Tipo cortical)

Fuente: Propia

- **Asignación de GMPE a cada fuente sismogénica.**

Se asignaron GMPE de Youngs a fuentes de tipo subducción interplaca e intraplaca y GMPE de Sadigh a fuentes de tipo cortical. (ver Figura 3.8)

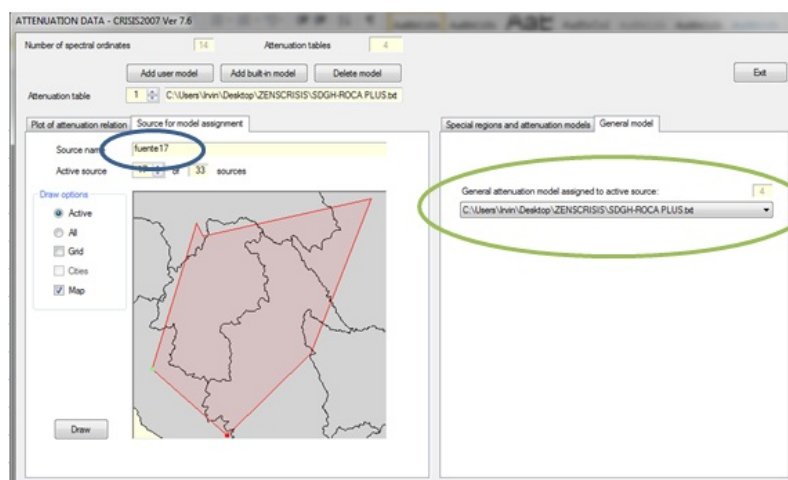


Figura 3.8: Asignación de GMPE a cada fuente sismogénica en CRISIS 2007 (Fuente 17/Tipo cortical)

Fuente: Propia

■ **Cálculo de amenaza sísmica.**

Con base en una metodología probabilista CRISIS 2007 obtiene mapas de intensidad asociada a diversos periodos de retorno. (ver figura 3.9)

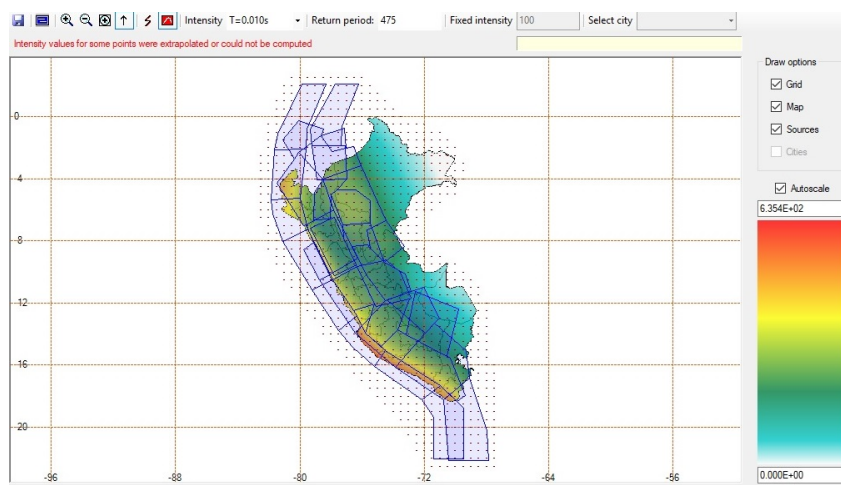


Figura 3.9: Peligro Sísmico de Peru: PGA para Tr=475 Años

Fuente: Propia

Como era de esperarse, las mayores intensidades se tienen en la costa del país, región que se encuentra muy cerca de la zona de subducción de las placas tectónicas; la costa sur, a partir de Paracas, se observa mayores intensidades de la costa, debido principalmente a una mayor cercanía a la zona de subducción, y a la presencia de fuentes con una gran actividad sísmica (Fuente 3). La zona de menores intensidades es la selva del Perú (departamentos de Loreto y Madre de Dios) cercana a las fronteras con Colombia y Brasil.

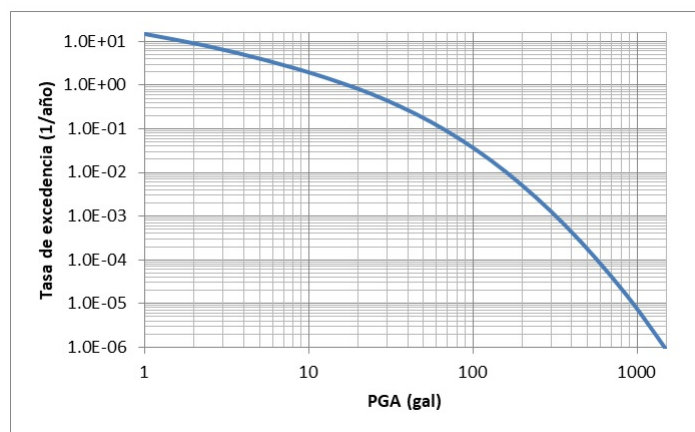


Figura 3.10: Curva de amenaza para la ciudad de Ayacucho (Ref. Catedral de la ciudad)

Fuente: Propia

CRISIS 2007 también muestra los resultados en curvas de amenaza, donde se expresa la tasa de excedencia de intensidades para diferentes ordenadas espectrales. En la Figura 3.10

presenta la curva de amenaza para un punto de la ciudad de Ayacucho en PGA. Por ejemplo para una aceleración 300 gal, tenemos una tasa de 0.0012, que representa a un periodo de 833 años. Es decir el tiempo que en promedio debe pasar entre dos eventos con aceleración mayor o igual a 300 gal es 833 años.

Dado que CRISIS 2007 realiza una evaluación espectral, es posible obtener como resultados los espectros de amenaza uniforme para diferentes periodos de retorno. La Figura 3.11 presenta el espectro de aceleración para la ciudad de Ayacucho para diferentes periodos de retorno. Según esa figura, en ese punto el valor de aceleración para 475 años de periodo de retorno es aproximadamente 253 gal (0.26g) en PGA. Esto quiere decir que, en 50 años hay una probabilidad del 10 % que se presente al menos un evento que produzca una intensidad igual o superior a los 253 gals.

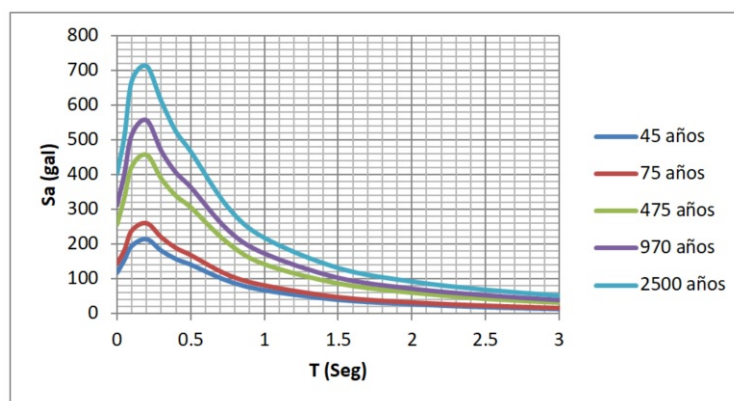


Figura 3.11: Ordenadas espectrales para sismos con diferentes periodos de retorno en la ciudad de Ayacucho (Ref. Catedral de la ciudad)

Fuente: Propia

EL modelo de sismicidad desarrollado por el IGP, debe ser exportado a un archivo binario de extensión (*.AME) para su posterior empleo en la estimación de pérdidas causadas por terremotos con CAPRAGIS. A diferencia del modelo en CRISIS 2007, el cálculo de pérdidas con CAPRA no se basa en curvas de tasas de excedencia de intensidad o mapas de isoaceleración, sino en un conjunto de escenarios, identificados por la ubicación teórica de su epicentro, su magnitud, y su frecuencia de ocurrencia (estimada con base en el modelo de recurrencia Gutenberg-Richter modificada).

El archivo (*.AME) generado considera todas las medidas de intensidad empleados en esta investigación, desde PGA hasta aceleraciones espectrales para periodos entre 0 y 3 segundos, siendo estas incorporadas a CRISIS 2007 al momento de generar la amenaza sísmica. En total, el archivo AME contiene información de 62930 escenarios sísmicos determinados a partir de las zonas sismogénicas del modelo del IGP y de los parámetros considerados por el usuario (Ecuación 3.7.2). Se considera que el epicentro de cada escenario está ubicado en el centroide de la subfuente.

3.7.2.6. Selección de escenario crítico de análisis

Debido a que la presente investigación también tiene como objetivo realizar la estimación de pérdidas por escenario único, se hace la búsqueda de un evento que represente altos niveles

de intensidades sísmicas de interés en una zona central de la ciudad de Ayacucho.

El IGP en su estudio realizado el 2014 (IGP, 2014) obtuvo mapas de amenaza a nivel nacional, como el mostrado en la Figura 3.12, que representa a las aceleraciones máximas del suelo (PGA) que tienen una probabilidad del 10% de ser excedidas en 50 años, o, lo que es lo mismo, que tienen un periodo de retorno de 475 años. Según esta figura, para la zona de estudio el valor de aceleración para ese periodo de retorno es aproximadamente 260 gal (0.27g), valor similar a lo obtenido en la evaluación de amenaza en la presente investigación (Figura 3.11). Esto quiere decir que, en 50 años hay una probabilidad del 10% que se presente al menos un evento que produzca una intensidad igual o superior a los 260 gal. La posibilidad de eventos que pueden afectar en la zona de investigación son muchas; de hecho, una intensidad así puede causarla un evento mediano con fuente muy cercana al proyecto, o bien un sismo muy grande con fuente a cierta distancia. La probabilidad (y el periodo de retorno) estimada considera todos los posibles eventos que puedan ocurrir, de manera que no es posible asociar esta intensidad a un único evento.

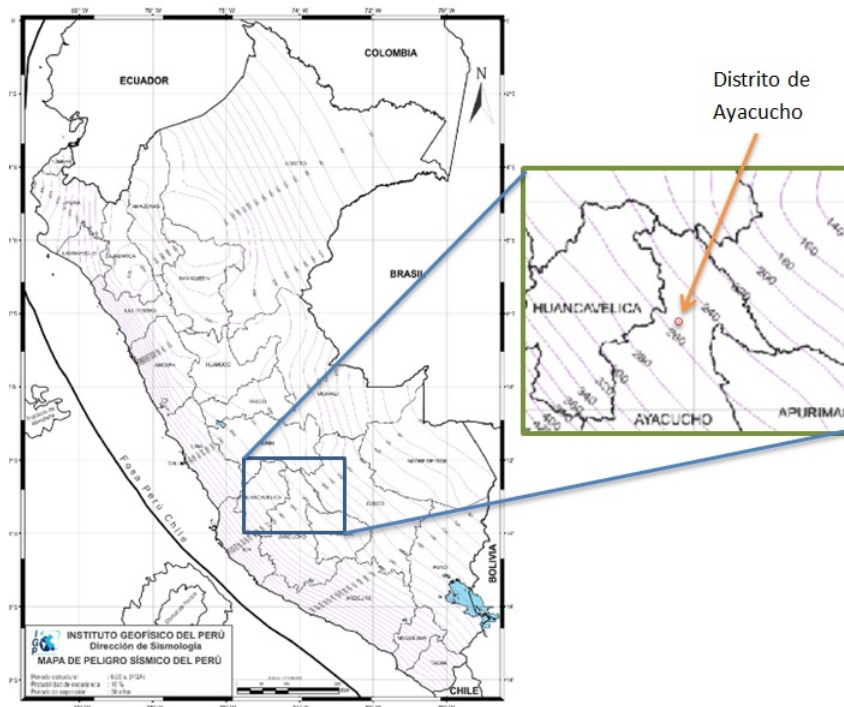


Figura 3.12: Mapa de amenaza sísmica elaborado por el IGP para Aceleración Máxima del Suelo (gal) y 10% de probabilidad de excedencia en 50 años

Fuente: Propia

Por otra parte, dado que se trata de un modelo probabilista, las intensidades producidas por un evento son también probables, de manera que no hay un valor de intensidad asociado a cada evento sino una distribución de probabilidad de intensidades.

Con el objeto de poder determinar un evento representativo asociado a un periodo de retorno de 475 años se empleó la tabla de desagregación del modelo de amenaza dada en CRISIS 2007, ella contiene la representación gráfica de la desagregación de la amenaza, en función de la magnitud y la distancia. Estos resultados desagregados indican qué combinaciones de magnitud y distancia contribuyen más a la amenaza sísmica en un punto determinado,

para una medida de intensidad dada y a cierto nivel de intensidad. En esta investigación, la desagregación para la aceleración máxima del suelo para un periodo de retorno de 475 años se muestra en la Figura 3.13.

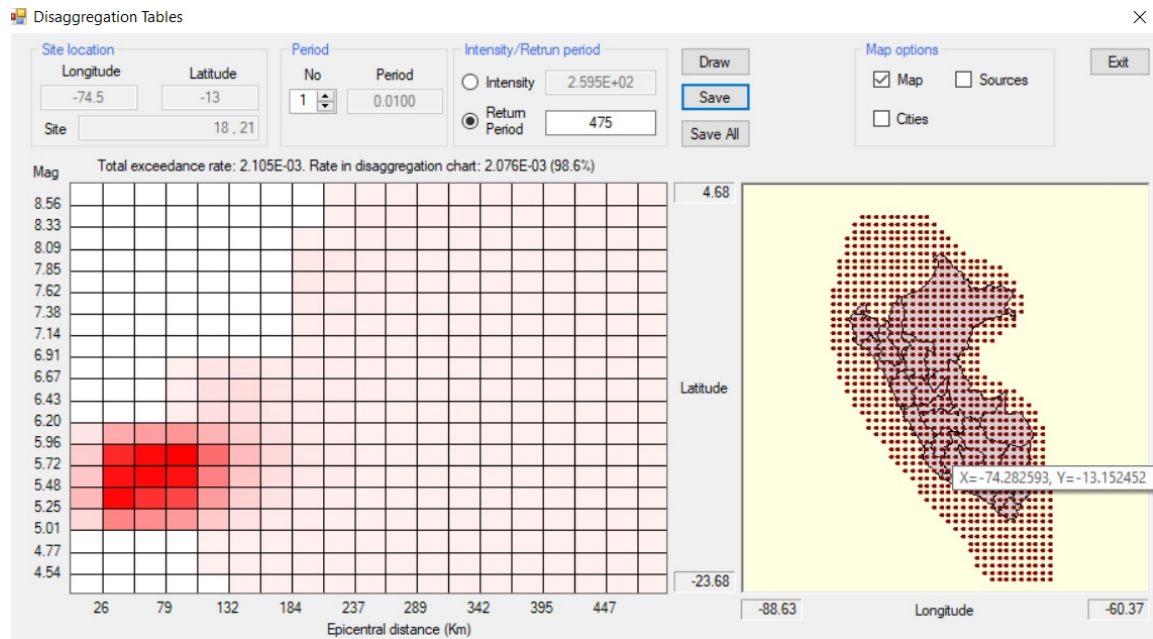


Figura 3.13: Tabla de desagregación del modelo de amenaza sísmica en CRISIS 2007

Fuente: Propia

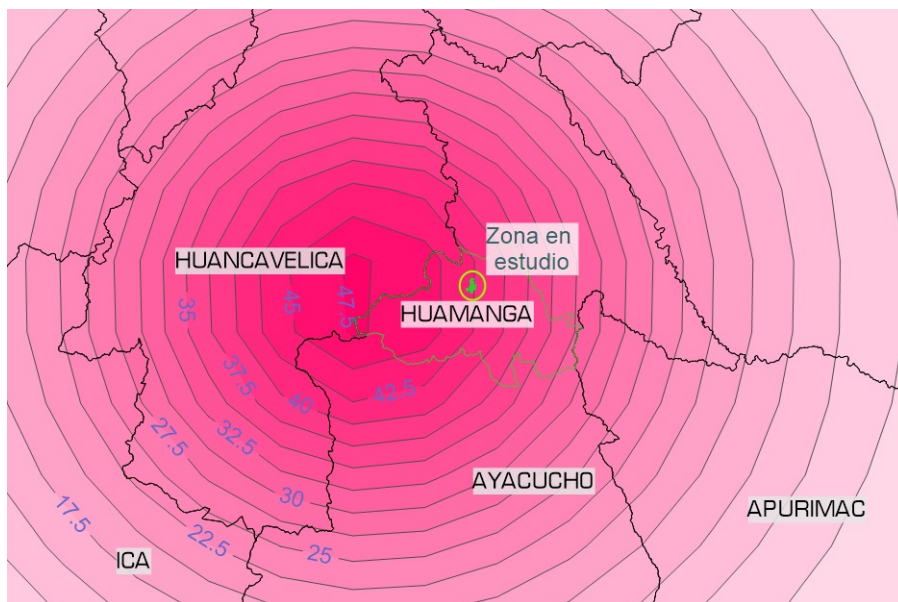


Figura 3.14: Huella de intensidades (PGA en gals) para el escenario Mw=5.5

Fuente: Propia

De acuerdo con esta tabla, el aporte a la tasa se encuentra distribuido entre varios escenarios. Como ejemplo el escenario que más contribuye (en otras palabras, el más probable) a

la amenaza en la ciudad de Ayacucho es un evento de magnitud $M_w=5.5$ y a una distancia de unos 50 km aproximadamente, cuya huella de media de intensidades (PGA en gal) es la mostrada en la Figura 3.14. De acuerdo con esto, la media de PGA en el lugar del proyecto será aproximadamente 42.5 gal (0.04g). En el Capítulo 4 se muestran los resultados de riesgo para este escenario. A manera de referencia es importante indicar que el evento seleccionado tiene características muy similares al sismo del 10 de noviembre de 1980 ($M_b=5.3$), que tuvo una profundidad de 33 km y que tuvo origen a 50 km de la ciudad. Hasta la actualidad, este evento es uno de los que ha generado mayores intensidades en el área de estudio (V-VII MSK).

3.7.2.7. Modificación de parámetros por efectos de sitio

Una estimación detallada del peligro deberá prestar atención a los efectos locales de amplificación por condiciones de topografía, subsuelo o clima. Estas condiciones particulares, que pueden ser diferentes aún en distintos puntos de una misma localidad o ciudad, pueden modificar el contenido frecuencial y la amplitud de un sismo, haciéndolo más o menos destructivo. Es decir, los resultados de análisis de peligro sísmico a nivel macro, pueden ser modificados por variaciones que sólo pueden ser monitoreadas a nivel local. (Mesta, 2017, p.8)



Figura 3.15: Amplificación sísmica del distrito de Ayacucho

Fuente: Adaptado de (Quispe, 2004)

Los efectos de sitio en el distrito de Ayacucho fueron evaluados, como parte de estudio de riesgo sísmico (Quispe, 2004), se realizaron mapas de zoonificación en función de la aplicación sísmica por efectos de sitio del área de estudio, clasificando parte de la ciudad en tres zonas (ver Figura 3.15): la zona “1” con amplificaciones de 1 a 1.5, la zona “2” con amplificaciones de 1.5 a 2 y la zona “3” con amplificaciones de 2 a 2.5. Para el mapeo se consideraron estudios anteriores como microtrepidaciones, geotécnia, geológicos y topográficos.

El comportamiento dinámico de depósitos estratificados se modela mediante funciones de transferencia espectrales, las cuales permiten conocer el valor de amplificación por el cual se deben modificar las aceleraciones espectrales calculadas a nivel de terreno firme. Estas funciones de transferencia deben construirse para diferentes valores de aceleración máxima del terreno, con el fin de tener en cuenta el efecto no lineal de degradación de los suelos. En la Figura 3.16 se presenta una función de transferencia espectral típica. (ERN, 2010)

A partir de la función de amplificación definida para el sitio de análisis, las aceleraciones espectrales a nivel de superficie Sa_{sup} , se calculan mediante la Ecuación 3.7.7. En dicha ecuación $A_{A\text{máx}}$ es el nivel de amplificación calculado para un valor de $A_{\text{máx}}$ (aceleración máxima del terreno firme) dado, y Sa_{tf} es la aceleración espectral calculada a nivel del terreno firme, empleando el modelo de amenaza sísmica.

$$Sa_{sup} = A_{A\text{máx}} \cdot Sa_{tf} \tag{3.7.7}$$

En el área de estudio, distrito de Ayacucho, no se encontraron 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 a partir del estudio (Quispe, 2004), el cual toma en cuenta la amplificación de las aceleraciones para tres zonas de la ciudad.

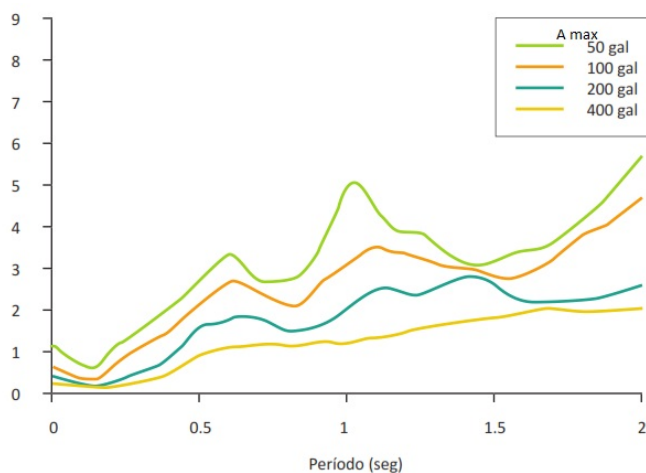


Figura 3.16: Función de transferencia espectral para un suelo intermedio en la ciudad de Bogotá

Fuente: Adaptado de (Salgado *et al.*, 2013)

Para la presente investigación se crearon funciones de amplificación lineales para cada tipo de suelo, tomando como factor de amplificación 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 (0(s) a 3(s)). Por ello se definieron tres tipos de suelo “S1”, “S2” y “S3” con valores de amplificación de 1.5, 2 y 3 respectivamente, los edificios que se encuentran ubicados sobre ningún tipo de suelo no tienen definido algún valor de amplificación.

El mapa de amplificación sísmica para el distrito de Ayacucho se tiene en formato tipo imagen (*.jpg), este se importará a un formato de sistema de información geográfica (*.shp). Para ello se digitalizará la información y se generarán un archivo con información georeferenciada. A partir de ese archivo 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 CRISIS 2007) (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) (ver Figura 3.17). La resolución de la malla es definida por el usuario, y a mayor resolución habrá mayor precisión en el cálculo de las intensidades. En el Capítulo 4 se muestran los resultados de riesgo por tipo de suelo definido.

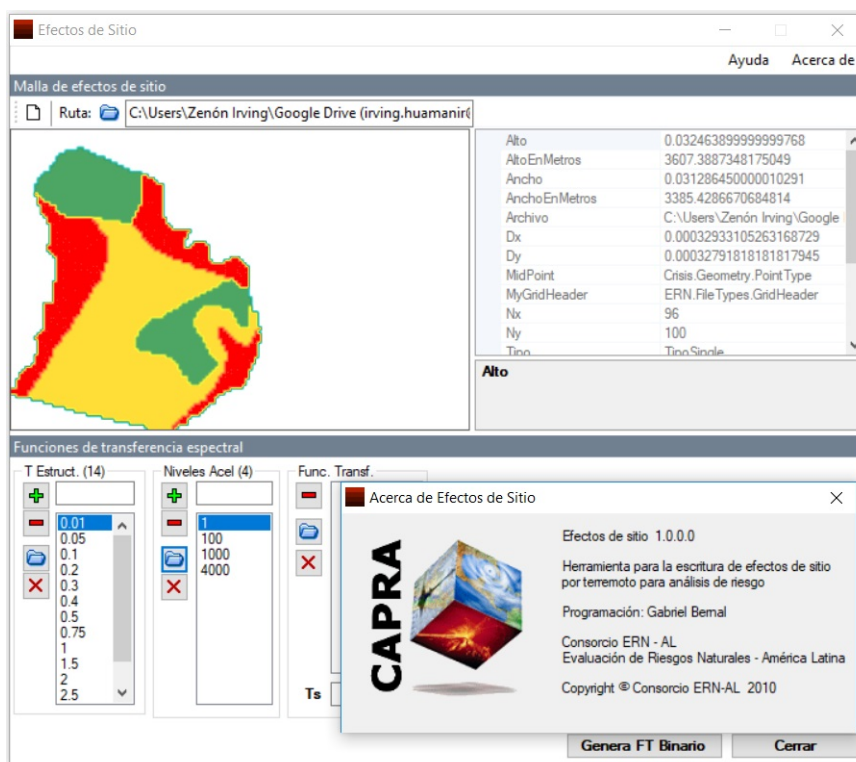


Figura 3.17: Vista de la pantalla del programa Efectos de Sitio, para incluir microzonificación sísmica en CAPRA

Fuente: Propia

3.7.3. Exposición

La exposición se refiere a los componentes de infraestructura o a la población 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. Para conformar la base de datos de exposición se requiere levantar la información necesaria o recopilarla a partir de bases de datos existentes, censos de población o vivienda, datos estadísticos sociales, económicos o de construcción. Una vez recopilada la información, debe ser consolidada en una base de datos y georreferenciada en formato SIG. (Palomino y Tamayo, 2016; ERN, 2010)

En esta sección se describe el procedimiento seguido para la recopilación y procesamiento de los datos de exposición a partir de diversas fuentes con base en ello la creación de una base de datos en SIG. También se describe el formato necesario de la base de datos para su posterior uso en CAPRAGIS. 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 la siguiente sección.

3.7.3.1. Parámetros generales

La valoración del riesgo de infraestructura expuesta exige la conformación de una adecuada base de datos georeferenciada de activos en una determinada zona, para la cual se tenga disponible información de amenaza sísmica. En términos generales, el análisis de riesgo que se desee realizar obliga a la consecución de determinada información básica que debe quedar en el inventario de activos disponible. En particular, el inventario debe incluir información referente a los siguientes temas específicos (ERN, 2010):

- Ubicación de cada elemento a evaluar. En ese sentido, todas las bases de datos que se han obtenido han sido integradas en un SIG, en el cual todos los elementos están georeferenciados, es decir, cada uno de los registros de la base de datos tiene intrínsecamente asociada su ubicación. En la presente investigación, parte de la información ha estado en SIG, y parte otra parte ha sido necesario crear los archivos necesarios (shapefiles) para ello las coordenadas empleadas en todos los casos ha sido coordenadas geográficas.
- Tipo. Es la clasificación para la estimación del riesgo (en función a la geometría del edificio material y fecha de construcción, sistema estructural, etc.). En el caso de viviendas, el tipo depende de características como el material de construcción, la altura de la edificación, la amplitud de los espacios y la disposición de la arquitectura.
- Valor del elemento. Se refiere al valor monetario del inmueble. Se ha acordado que este valor sea el valor de reposición como nuevo del elemento, ya que es el valor con el que mejor se puede dimensionar el impacto que movimientos sísmicos futuros tendrán sobre la cartera de bienes inmueble de propiedad del Estado.

3.7.3.2. Nivel de resolución del modelo

Según la información asignada, los modelos de elementos expuestos (modelos de exposición) pueden ser de 3 niveles (ERN, 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 a partir de una base de datos de catastro. La información recolectada permitió establecer las diferentes tipologías estructurales en las viviendas.

3.7.3.3. Levantamiento y recopilación de la información

La principal fuente de información utilizada para construir la base de datos fue proporcionada por la Sub Gerencia de Ordenanza Territorial y Catastro de la Municipalidad Provincial de Huamanga actualizada al año 2018. Dicha información se encontraba dispuesta principalmente en dos tipos de archivos:

1. Información georeferenciada en formato (*.shp)

Contiene la información de las estructuras con codificación de polígonos de cada lote a nivel del distrito de Ayacucho. A cada polígono le asignaron una información, en la Tabla 3.2 se muestra la estructura de la base de datos. Al revisar la información a detalle se encontró que varios de los registros del campo MEP estaban vacíos, esta información fue completada a partir de la información en formato (*.dwg). En total se obtuvo información de 19,339 registros.

Tabla 3.2: Estructura base de datos por lote (base catastro Ayacucho)

Nombre del campo	Descripción	Tipo	Estado	Valores Posibles
LtCATASTRO	Código de lote	Numérico	Completo	Número entero
MzCATASTRO	Código de manzana	Numérico	Completo	Número entero
SECTOR	Código de sector	Numérico	Completo	Número entero
HAB_URBANA	Habilitación urbana	Texto	Completo	Texto
USOS	Usos	Texto	Completo	Texto
COD_USO	Código de uso	Numérico	Completo	Número entero
EQ_URBANO	Equipamiento urbano	Texto	Completo	Texto
ALT_PISO	Altura de piso	Numérico	Completo	Número entero
MEP	Material estructural predominante	Numérico	Incompleto	01: Concreto 02: Ladrillo 03: Adobe
ECS	Estado de conservación	Numérico	Incompleto	01: Muy bueno 02: Bueno 03: Regular 04: Malo

Fuente: Propia

2. Información en formato (*.dwg)

Contiene la información de las estructuras por edificación, estas se encontraban dispuestas por capas, que tenían asignadas atributos como el número de pisos y tipo de estructura (albañilería ó adobe). Esta información resultó muy útil pues a partir de esta

se completaron los campos vacíos acerca del tipo estructural que se tenían en la base en formato (*.shp).

3.7.3.4. Procesamiento de la información

El enfoque principal de esta etapa fue la revisión, adecuación, actualización y depuración de la información que había sido entregada en formatos shapefile, de tal manera que este cuente con los campos necesarios para calcular el riesgo en el programa CAPRAGIS.

Al revisar la información a detalle se encontró que varios de los registros del campo MEP estaban vacíos, esta información fue completada a partir de la información en formato (*.dwg).

Para ello, empleando un SIG se exportó la información que se tenía en formato (*.dwg) a formato (*.shp), seguidamente se establecieron vínculos espaciales a partir de un código de identificación. El siguiente paso fue establecer el MEP por lote, el cual se determinó a partir del mayor valor del producto de las áreas por el número de pisos de cada edificación. Finalmente para cada registro vinculado a través del código de identificación se obtuvo el MEP y el número de pisos asociado a cada valor de MEP.

Para los propósitos de esta investigación no se tomaron en cuenta las construcciones de los rubros “No destinado” y “Otros”. En el primer caso por tratarse de locales que cumplen otra función primaria diferente a la vivienda. En esta categoría se incluyen las construcciones como: fábricas, almacenes, edificios comerciales, oficinas, instituciones gubernamentales, escuelas, colegios, universidades, hoteles, iglesias etc. El rubro “Otros” incluye cualquier otro tipo de construcción como: parques, plazas, losas deportivas, etc (ver Tabla 3.3).

Tabla 3.3: Construcciones en el distrito de Ayacucho (base catastro Ayacucho)

Construcciones	Lotes	
Casa independiente	15,974	82.60 %
No destinado	1,993	10.31 %
Otros	105	0.54 %
Sin construir	1,267	6.55 %
Total	19,339	100.00 %

Fuente: Propia

Finalmente, la base de datos del portafolio de vivienda del distrito de Ayacucho quedó conformada por 15,974 edificaciones. En general, los materiales predominantes en las viviendas son el ladrillo (64.37 %) y el adobe (35.63 %), estos valores son similares a los obtenidos por (Quispe, 2004). En ese estudio en un muestreo que realiza para una determinada zona de la ciudad de Ayacucho el 64.77 % son de ladrillo y el 35.23 % son de adobe y otros materiales. Con respecto al número de pisos, las viviendas tienen en promedio un piso. La mayoría de las casas (87.12 %) tienen uno o dos pisos (ver Figura 3.18).

En el caso del presente estudio se consideró que las estructuras de quincha y adobe se contabilizan bajo el rubro de “adobe”. De la misma manera las edificaciones de piedra con barro usadas normalmente en chozas rurales se adicionan también al rubro de adobe.

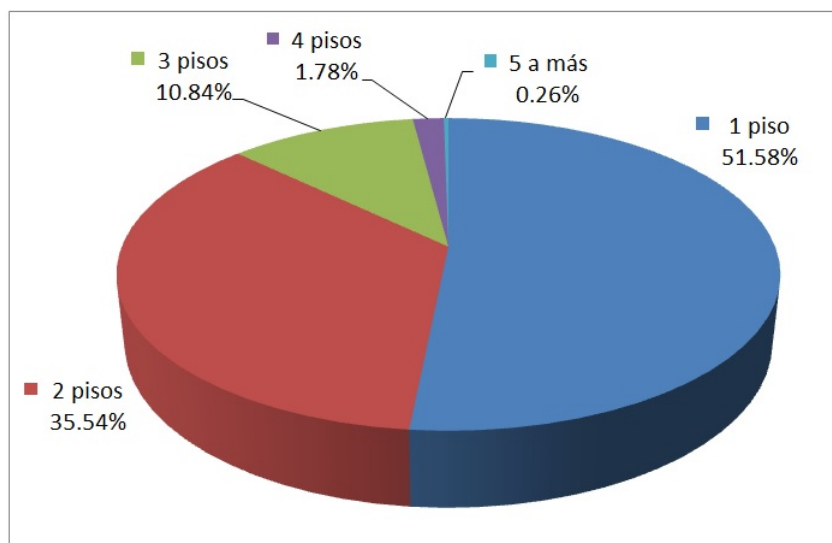


Figura 3.18: Porcentajes de viviendas por pisos en el distrito de Ayacucho

Fuente: Propia

3.7.3.5. Clasificación de las viviendas en el distrito de Ayacucho

En esta investigación, las edificaciones de vivienda del distrito de Ayacucho, se clasificaron por su tipo estructural y número de pisos, que define su comportamiento frente a los sismos. Adicionalmente fue necesario distinguir algunas prácticas arquitectónicas que modifican el comportamiento de las estructuras como la calidad de la supervisión técnica.

La determinación del sistema estructural se realizó a partir de los datos recopilados de Castastro y la identificación de algunas características de los materiales de construcción. El documento (Santa-Cruz y Zeballos, 2009) describe algunas variables para la clasificación de viviendas, a continuación de describe un adaptado de esas variables en el presente estudio:

- La primera variable considerada fue el tipo de vivienda, que para el presente estudio representa el rubro “Casa independiente” (ver Tabla 3.3).
- La segunda variable fue el material de construcción predominante de las paredes. A partir del cruce de las variables censales de tipo de vivienda y material de las paredes se concluye que los principales materiales de construcción por tipo de vivienda son el ladrillo y adobe.
- La tercera variable fue la calidad de la supervisión o estructuración de la infraestructura. Esta variable considera por ejemplo que existen malas prácticas en la albañilería que reducen la capacidad y buen comportamiento sísmico que puede tener una albañilería realizada con una buena supervisión técnica. La variable de calidad de la construcción no se obtiene a partir de los datos de catastro pero se puede estimar indirectamente a partir de estadísticas de autoconstrucción, NSE y tipo de materiales para cada zona o región (ver Sección 3.7.3.5).
- La cuarta variable fue el número de pisos. Dentro de esta variable se considera que las viviendas de ladrillo se agrupan en tres subtipos tipos: “ALB-1” que consta de un solo nivel, “ALB-2” que constan de 2 y 3 niveles y “ALB-3” constituidas por 4 a más

niveles. Las casas clasificadas como de adobe “ADOB” tienen entre 1 y 2 pisos. Esta subdivisión de tipologías se establecieron con base a la disponibilidad de funciones de vulnerabilidad encontradas en investigaciones realizadas para edificaciones de viviendas en el Perú (ver Sección 3.7.4).

En resumen, el procedimiento para obtener la clasificación de la vivienda por tipo estructural a partir de los datos de catastro es el que se muestra en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4: Esquema para la clasificación de la vivienda tipo casa independiente

Primera variable	Segunda variable	Tercera variable	Cuarta variable
Tipo de vivienda	Material estructural predominante	Calidad de construcción	Nro. de pisos
Casa independiente	Ladrillo	Con / Sin supervisión	Entre 1 y 6
	Adobe	Con / Sin supervisión	1 y 2

Fuente: Adaptado de (Santa-Cruz y Zeballos, 2009)

Tabla 3.5: Características de tipologías para el sector vivienda

Tipo	Descripción
Tipo 1 Casa de ladrillo	<ul style="list-style-type: none"> - Vivienda unifamiliar independiente, en quinta o condominio, ubicada en zonas consolidadas y poco consolidadas. - Probablemente construida de manera informal o sin asistencia técnica. - Con alturas entre 1 y 6 pisos. - El sistema estructural generalmente es albañilería confinada, en menor proporción albañilería no confinada. - El material predominante en las paredes es ladrillo, y los techos son losas aligeradas de concreto armado.
Tipo 2 Casa de adobe	<ul style="list-style-type: none"> - Vivienda unifamiliar independiente, en quinta o condominio, ubicada generalmente en zonas urbanas antiguas o en zonas alto-andinas. - Probablemente construida de manera informal o sin asistencia técnica. - Con alturas entre 1 y 2 pisos. - El sistema estructural es albañilería sin confinar. - El material predominante en las paredes es adobe o adobe con quincha, y los techos son compuestos de viguetas de madera cubiertos con barro y caña, o calamina.

Fuente: Adaptado de (Mesta, 2017, p.14)

(Mesta, 2017) menciona que en el año 2014 el Consorcio CIRNA-PUCP elaboró un perfil de riesgo sísmico a nivel nacional, donde se evaluó, entre otros sectores, el sector vivienda. La clasificación propuesta por dicho estudio se obtuvo a partir de la combinación de las variables ya mencionadas. En la Tabla 3.5 se presenta una breve descripción de dos tipologías utilizadas

en el presente estudio y que fueron adaptadas de (Mesta, 2017).

En las Figuras N° 3.19 a 3.20 se muestran diferentes viviendas del distrito de Ayacucho.



Figura 3.19: Ejemplos de vivienda Tipo 1, casa de ladrillo

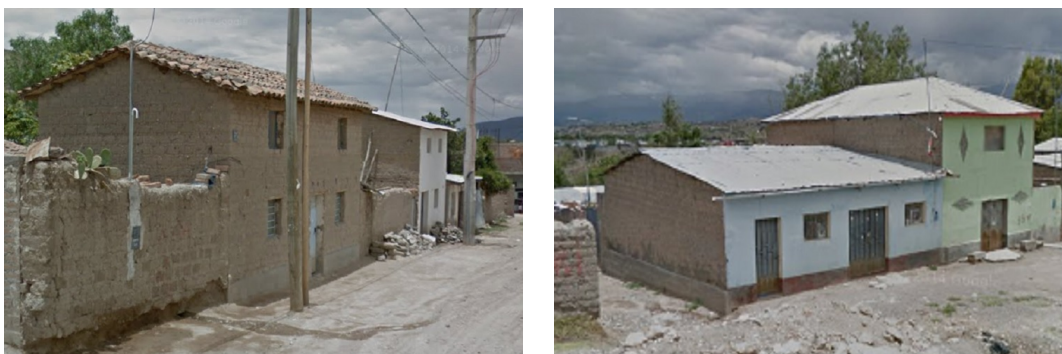


Figura 3.20: Ejemplos de vivienda Tipo 2, casa de adobe

Clasificación de vivienda en Ayacucho por el nivel socio-económico

La relación entre vivienda y nivel socioeconómico (NSE) en las zonas urbanas ha sido estudiada desde el punto de vista de mercadeo y de determinación de niveles de pobreza. En el primer caso se tiene como ejemplo el estudio de la Asociación Peruana de Empresas de Investigación de Mercados, APEIM, en donde se describen las características de las viviendas por nivel socioeconómico. (ver Tabla 3.6).

En el presente estudio las viviendas fueron clasificadas por el nivel socioeconómico con dos fines:

- Determinar el riesgo de los sectores menos favorecidos que probablemente se vean incapacitados de recuperar sus bienes en caso de un sismo que devaste sus propiedades.
- Asignar costos unitarios diferenciados a las viviendas y contenidos.

Tabla 3.6: Vivienda y niveles socioeconómicos

NSE	TIPO DE VIVIENDA
A	La vivienda está construida de material noble. El abastecimiento de agua y el servicio de desagüe proceden de red pública. Los pisos son de parquet, alfombra, mármol, terrazo o cerámico. Las paredes y techos son de concreto pintado o enchapado.
B	La vivienda está construida de material noble. Hay una mayor participación de materiales como mayólica y loseta en los pisos. El abastecimiento de agua y desagüe procede de la red pública.
C	El tipo de vivienda predominante es la casa independiente y construida de material noble. El abastecimiento de agua y el servicio de desagüe proceden de red pública. Los pisos son de cemento, mayólica y loseta. Las paredes y techos son de concreto armado revestido pintado
D	El tipo de vivienda predominante es la casa independiente, construida mayormente de material noble. El abastecimiento de agua y el servicio de desagüe proceden de red pública, sin embargo, existe un grupo que utiliza los camiones cisternas. Los pisos son en su mayoría de cemento. Las paredes con ladrillo revestido alcanzan el 56.4 %, un grupo menor tiene ladrillo sin revestir.
E	Viven en casa independiente y en casa vecindad (callejón, corralón). El abastecimiento de agua y el servicio de desagüe proceden de camiones cisternas (60.8 %). Las viviendas tienen pisos de cemento y otras suelen ser de tierra. El material de las paredes es de estera, cartón, madera prensada (triple), madera (39.0 %), adobe o ladrillo sin revestir (38.8 %).

Fuente: Adaptado de (APEIM, 2007)

La distribución de la población por nivel socioeconómico (NSE) realizados por el APEIM para el departamento de Ayacucho se muestran en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7: Distribución de hogares según NSE 2017 - Departamento de Ayacucho

Departamento	Hogares nivel socioeconómico (%)			
	AB	C	D	E
Ayacucho	5.9	19.0	25.7	49.4

Fuente: Adaptado de (APEIM, 2017)

3.7.3.6. Valoración económica de viviendas

Para la evaluación del riesgo sísmico de viviendas con fines de planificación en términos financieros, el valor de la infraestructura debería estar asociado al monto que el Estado tendría que desembolsar en distintos escenarios sísmicos para la reconstrucción o rehabilitación de la infraestructura dañada. Queda claro que la eventual reparación o reconstrucción de la infraestructura antigua no podría ejecutarse con los mismos estándares con los que fueron construidos, el valor de la infraestructura es el costo de reconstrucción con los estándares propuestos en las normativas de construcción vigentes en el momento de análisis. (Santa-Cruz,

2013, p.31)

El costo de la infraestructura depende de los materiales con los que están contruidos y del área construida. Para evaluar los costos de las edificaciones se utilizaron las tablas de la Resolución Ministerial 414 - 2017 - VIVIENDA, que brinda información detallada sobre los costos por metro cuadrado de edificaciones en las tres regiones del Perú. Dado el ámbito de estudio de la presente investigación se empleó la tabla referida a la sierra.

Estas tablas contienen columnas que corresponden a los elementos de la edificación (estructura, acabados e instalaciones eléctricas y sanitarias). En cada columna se presentan los valores unitarios para el rango de categorías posibles, desde las más costosas hasta las más económicas (A - I). El valor unitario para cada edificación se obtiene sumando los valores de todas las columnas de acuerdo a sus características predominantes. Este valor incluye los costos generales, la utilidad de las empresas constructoras y el IGV respectivo. El valor de la infraestructura de viviendas no incluye el valor de los contenidos ni las pérdidas indirectas por paralización de actividades. Los conceptos de precio o el valor contable no se ajustan a los requerimientos del estudio y no han sido tomadas en cuenta en la presente investigación. Usando las tablas de valores unitarios y la Tabla 3.6 (Tipo de vivienda por NSE) se obtuvo la tabla de costo que se muestra en la Tabla 3.8.

El área construida de cada lote se estimó de manera aproximada a partir de la información en formato (*.dwg) proporcionada por catastro, esta se exportó a formato (*.shp) y mediante un software para procesamiento de datos se determinó el área por lote.

En general el procedimiento para obtener el valor de reposición (VALFIS) de cada edificación ha consistido en multiplicar los costos por metro cuadrado según NSE (ver Tabla 3.8), los coeficientes de distribución de hogares según NSE (ver Tabla 3.7), el área y el número de pisos de vivienda (ver Ecuación 3.7.8). La información de VALFIS de cada vivienda es necesaria para poder utilizar CAPRA-GIS, como se verá en la Sección 3.7.3.7.

$$VALFIS = Costo/m^2(NSE) \times Coef.(NSE) \times \text{área} \times N^{\circ} \text{ de piso} \quad (3.7.8)$$

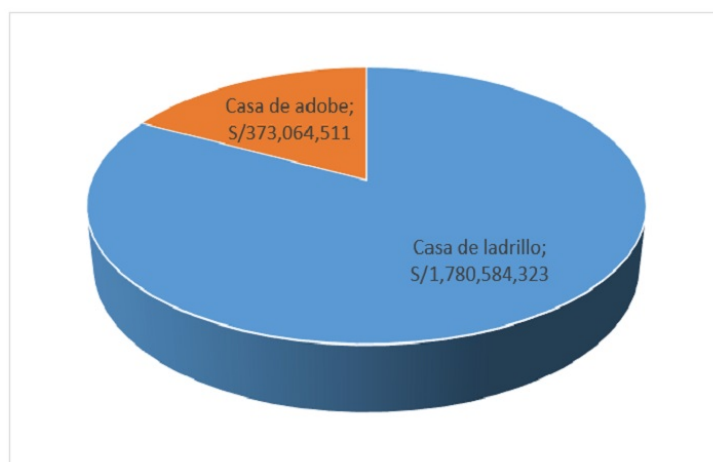


Figura 3.21: Valor de reposición de viviendas del distrito de Ayacucho

Fuente: Propia

El valor de reposición de viviendas en el distrito de Ayacucho resultó ser de S/. S/2 153 648 834, de los cuales el 83% corresponde a las viviendas de ladrillo y el 17% a viviendas de adobe. En la Figura 3.21 se puede apreciar con más detalle los valores expuestos en cada tipo de vivienda.

Tabla 3.8: Costo por m^2 de infraestructura en la sierra

CASA INDEPENDIENTE						
Nro	1	2	3	4	5	6
NSE	Alto	Medio	Bajo	Alto	Medio	Bajo
Material de paredes	Ladrillo	Ladrillo	Ladrillo	Adobe	Adobe	Adobe
Costo unitario paredes	S/ .231.02	S/ .231.02	S/ .213.38	S/ .167.52	S/ .167.52	S/ .167.52
Material de techo	Concreto	Concreto	Madera o tejas	Madera o tejas	Madera o tejas	Madera o tejas
Costo unitario techo	S/ .133.89	S/ .133.89	S/ .41.61	S/ .41.61	S/ .41.61	S/ .41.61
Tipo acabados	A	E	G,H,I	A	E	G,H,I
Costo unitario acabados e instalaciones	S/ .1,106.70	S/ .305.20	S/ .147.20	S/ .1,106.70	S/ .305.20	S/ .147.20
Costo unitario de construcción	S/ .1,471.61	S/ .670.11	S/ .402.19	S/ .1,315.83	S/ .514.33	S/ .356.33
Costo unitario subtotal	S/ .1,618.77	S/ .737.12	S/ .442.41	S/ .1,447.41	S/ .565.76	S/ .391.96
Costo unitario total inc. IGV	S/ .1,910.15	S/ .869.80	S/ .522.04	S/ .1,707.95	S/ .667.60	S/ .462.52

Fuente: Propia

3.7.3.7. Consolidación de la base de datos

La información recolectada en vivienda (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 CAPRAGIS, agregando los campos de datos (variables) obligatorios mostrados en la Tabla 3.9. 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, que posee herramientas para la georreferenciación y manejo de los datos antes de ser ingresados al programa CAPRAGIS. Cada fila contiene información de cada vivienda (incluyendo los campos obligatorios) y su respectiva geometría debidamente georreferenciada. Las características generales de la base de datos se muestran en la Tabla 3.10. La base de datos final (en formato Shapefile) se muestra en digital, en el Anexo C.

Tabla 3.9: Base de datos para formato GIS (SHAPES)

CAMPOS	TIPO	DESCRIPCIÓN
ID	Numérico	Número identificador de inmueble. (1 al 15,974)
T_VIV	Texto	Tipo de vivienda
N_PISOS	Numérico	Número de pisos
MEP	Texto	Material estructural predominante
SE	Texto	Sistema estructural
ÁREA	Numérico	Área construida de lote
VALFIS (*)	Numérico	Valor del inmueble expresado en términos monetarios.
VALHUM (*)	Numérico	Valor humano expresado en numero de ocupantes del inmueble. (No considerado en este estudio)
SE_SISMO (*)	Texto	Función de vulnerabilidad asignado al inmueble.

(*) Campo obligatorio en CAPRAGIS

Fuente: Propia

Tabla 3.10: 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	15,974
Tipo de objeto	Poligonos
Sistema coordenado	Geográfico
Datum	GCS_WGS_1984
Unidades angulares	Grados sexagesimales

Fuente: Propia

3.7.4. Vulnerabilidad

En esta sección se describe el procedimiento seguido para modelar funciones de vulnerabilidad de las tipologías estructurales definidas anteriormente (ver Tabla 3.5) utilizando modelos analíticos con base en información teórica. Para ello se emplean dos metodologías: La primera genera funciones de vulnerabilidad a partir de curvas de fragilidad, ellas sustentadas en investigaciones realizadas a distintos edificios en el Perú. La otra metodología esta sustentada en (Miranda, 1997), descrita en la metodología CAPRA. En esta metodología los parámetros estructurales de las tipologías definidas como viviendas son empleados a partir de tipologías equivalentes en HAZUS (FEMA, 2003). Las distorsiones máximas de entrepiso son calculadas con los factores de Miranda.

3.7.4.1. Enfoque empleado

Para la estimación del perfil de riesgo en términos de pérdidas probables es necesario modelar funciones de vulnerabilidad de los tipos que se han definido en las bases de datos de exposición.

Estas funciones deberán relacionar una intensidad dada con el daño o la pérdida promedio ocasionada en la estructura sometida a dicha intensidad. Generalmente las funciones de vulnerabilidad se expresan en porcentaje, en donde el valor cero corresponde a un estado de daño nulo y el valor de 100 % está asociado al colapso o pérdida máxima del sistema afectado. (Meli *et al.*, 2005, p.18)

Si una construcción es altamente vulnerable alcanzará su colapso para intensidades relativamente bajas, en tanto que una construcción con baja vulnerabilidad lo alcanzará para intensidades altas. Además, si el tipo de falla es frágil o abrupto, la función de vulnerabilidad presentará una configuración parecida a un pulso (gráfica a la izquierda en Figura 3.22); de manera contraria, si el tipo de falla resulta dúctil o paulatino con grandes deformaciones y desplazamientos, la función de vulnerabilidad tendría una configuración más atenuada parecida a una letra “S” (gráfica a la derecha en Figura 3.22). (ANR, 2006, p.13)

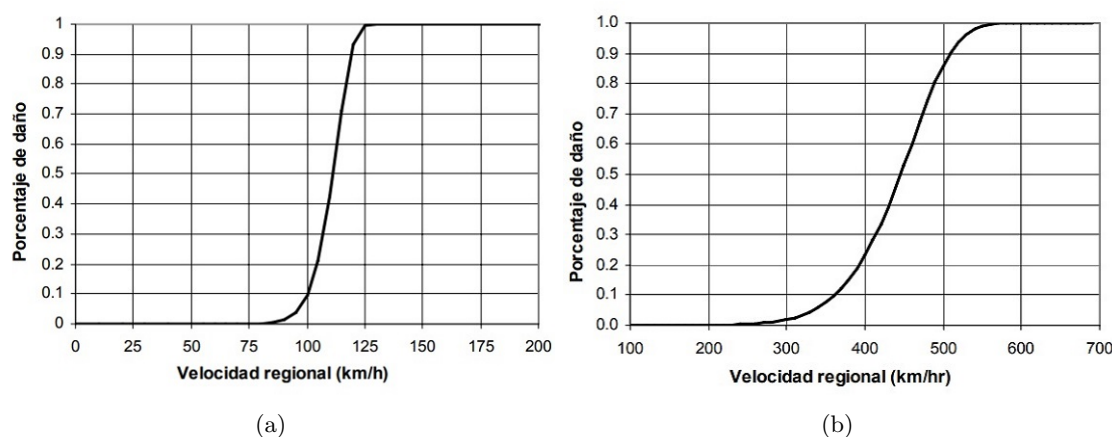


Figura 3.22: Ejemplos de funciones de vulnerabilidad para sismos: (a) Función de vulnerabilidad elemento con falla frágil; (b) Función de vulnerabilidad elemento con falla dúctil

Fuente: Adaptado de (ANR, 2006, p.13)

En general distintos componentes pueden tener funciones de vulnerabilidad que requieran como argumento de entrada distintas medidas de la intensidad de un fenómeno. Por ejemplo, en la Figura 3.23, las curvas de la derecha corresponden a distintos tipos de reservorios, en donde las funciones de vulnerabilidad son definidas a partir de la aceleración máxima del suelo. En cambio, las curvas de la izquierda corresponden a tuberías enterradas de distintos materiales, en las cuales las funciones de vulnerabilidad se han definido en términos de la velocidad máxima del suelo.

Otro aspecto que debe quedar claro es que estas funciones de vulnerabilidad no están libres de incertidumbre; no es sensato pensar que estas formulaciones matemáticas podrá predecir el estado de daños de un componente con absoluta precisión, y lo más probable es que el

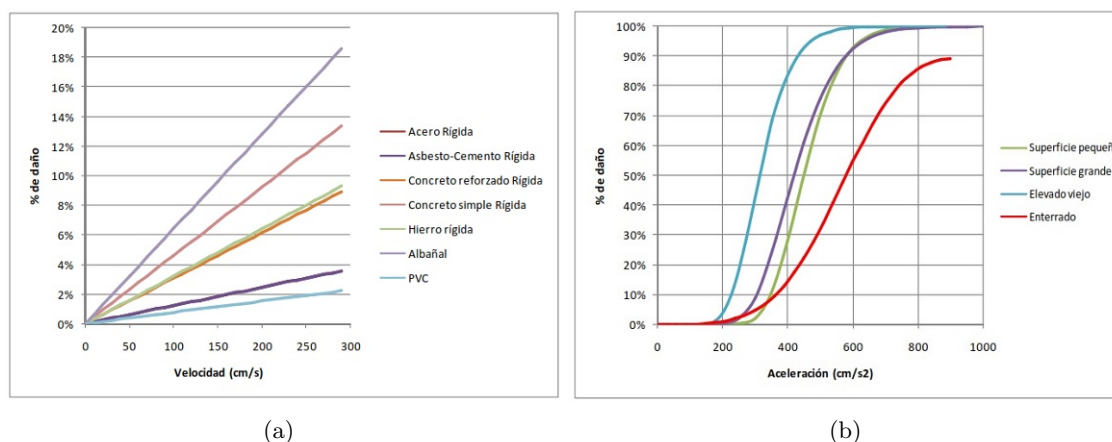


Figura 3.23: Funciones de vulnerabilidad típicas: (a) Función de vulnerabilidad para tuberías; (b) Función de vulnerabilidad para reservorios

Fuente: Adaptado de (WSP, 2012, pp.121,123)

resultado real del daño sea distinto del que se puede estimar con ellas. Debe considerarse que estas funciones proporcionan el valor esperado del daño, es decir, el valor promedio de daño que podrían experimentar elementos de características similares a la del elemento que describe la función de vulnerabilidad. Para completar la descripción será necesario hacer una estimación de la dispersión alrededor del valor medio del daño. Por ejemplo, en la Figura 3.24, la curva azul representa el valor medio o esperado del daño, que es el resultado de aplicar la función de vulnerabilidad correspondiente. Las curvas verde y morada son los valores medios del daño más y menos una desviación estándar, respectivamente. Puede observarse que en los valores extremos, cuando el daño es nulo o es total, la varianza es prácticamente nula, mientras que en valores intermedios de daño la varianza toma sus valores más altos.

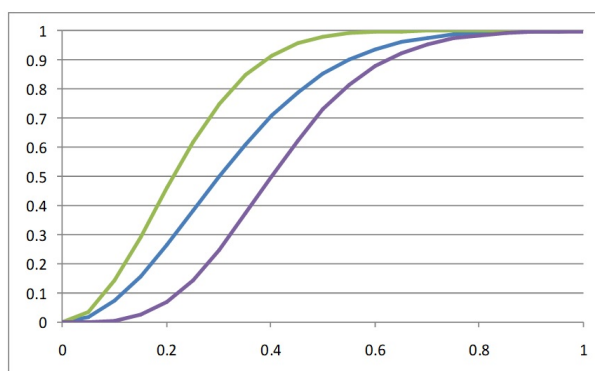


Figura 3.24: Valor esperado de daño y desviación estandar

Fuente: Adaptado de (CIRNA-PUCP, 2014, p.32)

La determinación de funciones de vulnerabilidad es una tarea que en sí misma es compleja. Cada construcción tiene una única manera de responder ante la acción de un sismo, y el nivel de daño esperado será función de esta particular manera de comportarse, por lo tanto es deseable contar con funciones de vulnerabilidad individuales, una por cada edificio

o construcción.

En el caso de estudios a nivel regional o nacional es más práctico emplear funciones de vulnerabilidad genéricas, como las incluidas en la plataforma CAPRA, para hacer una estimación del riesgo sísmico razonable a bajo costo. Este tipo de simplificaciones son aceptables en construcciones en la cuales se espera un comportamiento muy parecido, como es el caso de los edificios. Por ejemplo, es factible caracterizar con una sola función de vulnerabilidad (ya estudiada y conocida) a los edificios de albañilería confinada (por ejemplo, las viviendas).

Sin embargo, construcciones especiales como lo son los puentes, los túneles, tanques de agua, etc., deben ser analizados de manera individual para determinar una función de vulnerabilidad adecuada a ellas. (CIRNA-PUCP, 2014, pp.32,33)

3.7.4.2. Metodología para definir funciones de vulnerabilidad

En CAPRA la vulnerabilidad sísmica se expresa en términos de la llamada “función 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 3.25). 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 Sección 3.7.2).

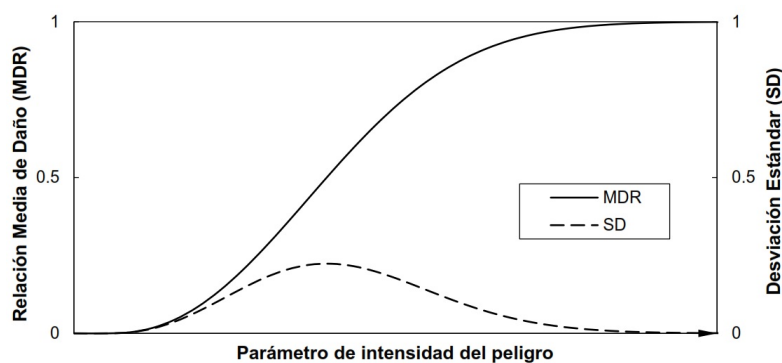


Figura 3.25: Representación típica de una función de vulnerabilidad

Fuente: Adaptado de (Palomino y Tamayo, 2016, p.46)

Las funciones de vulnerabilidad pueden ser empíricas, analíticas e híbridas. Para el caso de edificaciones se propone utilizar funciones analíticas calibradas o ajustadas con datos empíricos de sismos pasados. Se asignaron funciones de vulnerabilidad para cada tipo definido en las bases de datos de vivienda con base en el número de pisos, el sistema estructural.

Algunas funciones analíticas serán definidas a partir de estudios de fragilidad llevados a cabo para edificaciones en el Perú. Por ejemplo las funciones “ALB-1” y “ALB-2” se obtuvieron a partir de curvas de fragilidad obtenidas del artículo “Development of Fragility Curves

for Confined Masonry Buildings in Lima, Peru” de (Lovon *et al.*, 2018), de igual manera la función “ADOB” se estimó con base a la curva de fragilidad propuesta en la tesis “Seismic Risk Assessment of Adobe Dwellings” de (Tarque, 2008).

Finalmente para estimar la función de vulnerabilidad “ALB-3” se emplea la propuesta realizada por (Miranda, 1996; Ordaz *et al.*, 2000), descrita en la metodología CAPRA (ERN, 2010).

En general las funciones de vulnerabilidad asumidas en el presente estudio, consideran que las viviendas probablemente fueron construidas de manera informal o sin asistencia técnica. Estudios realizados como el de (Quispe, 2004) confirman esta tendencia pues el 71.27% de las viviendas resultan como autoconstruidas y solo el 28.73% tuvieron algún tipo de asesoría técnica.

En las siguientes partes de la presente sección se expone las metodologías ya mencionadas.

Estimación de funciones de vulnerabilidad a partir de curvas de fragilidad

En la presente sección se muestran los procedimientos realizados para obtener funciones de vulnerabilidad a partir de funciones de fragilidad, para ello tomó como referencia el artículo “Estimación de pérdidas sísmicas mediante curvas de fragilidad analíticas” de (Velásquez y Blondet, 2005).

Determinación de curvas de fragilidad

Las curvas de fragilidad permiten representar en términos probabilísticos la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones y proporcionan la probabilidad de que la respuesta de una estructura alcance o exceda determinado límite asociado con el daño, como función de un parámetro indicador de la intensidad sísmica. (Coronel y López, 2015, p.167)

Para definir la curva de fragilidad se adoptó una distribución lognormal, la cual se expresa como:

$$Pr(DS \geq ds_i/PIS) = \phi \left(\frac{\ln(PIS) - \alpha ds}{\beta ds} \right) \quad (3.7.9)$$

donde: PIS es el parámetro de intensidad sísmica, αds es la media del $\ln(PIS)$ para cada estado de daño, βds es la desviación estándar del $\ln(PIS)$ para cada estado de daño, ϕ es la distribución normal estándar acumulada y $Pr(DS \geq ds_i/PIS)$ es la probabilidad de que un estado de daño DS en la estructura alcance o supere el estado de daño ds_i , condicionado a la ocurrencia de un valor de PIS .

En la Tabla 3.11 se muestra parámetros proporcionados por (Lovon *et al.*, 2018) para la generación de curvas de fragilidad en viviendas de albañilería de tipo informal para uno y dos niveles. Empleando la Ecuación 3.7.9 y considerando los datos de la Tabla 3.11 se obtuvieron las curvas de fragilidad mostrados en la Figura 3.26. En la presente investigación estas curvas caracterizan a las tipologías “ALB-1” y “ALB-2” respectivamente.

Las funciones de fragilidad para viviendas de adobe fueron obtenidas a partir del estudio de (Tarque, 2008) (ver Figura 3.27). En la presente investigación estas curvas caracterizan a la tipología “ADOB”.

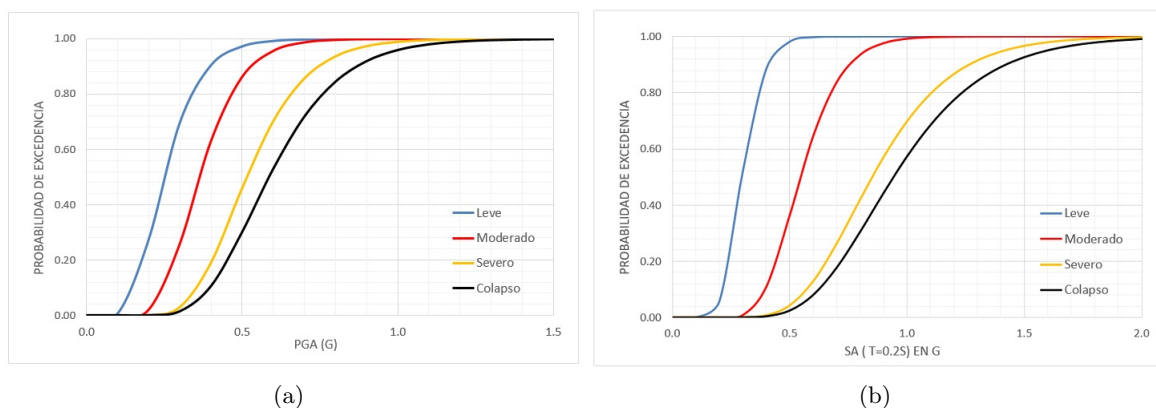


Figura 3.26: Funciones de fragilidad para viviendas de albañilería tipo informal: (a) Función de fragilidad para viviendas de un piso ; (b) Función de fragilidad para viviendas de dos pisos

Fuente: Propia

Tabla 3.11: Parámetros para funciones de fragilidad en viviendas de albañilería informal

Tipología	Parámetro	Estados de daño			
		Leve	Moderado	Severo	Colapso
Un piso Albañilería informal PGA	Media	0.266	0.379	0.537	0.615
	Desv. estándar	0.100	0.114	0.158	0.192
Dos pisos Albañilería informal Sa (T=0.2s)	Media	0.305	0.563	0.893	0.992
	Desv. estándar	0.077	0.145	0.283	0.327

Fuente: Adaptado de (Lovon *et al.*, 2018)

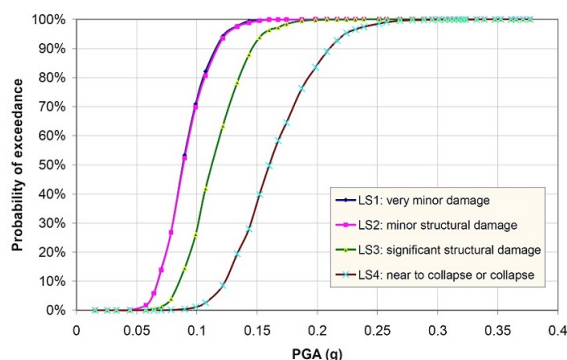


Figura 3.27: Funciones de fragilidad para viviendas de adobe

Fuente: Adaptado de (Tarque, 2008, p.89)

Por otro lado funciones de fragilidad de reconocidos autores como la de adobe (Tarque, 2008) y otros para diferentes tipos de estructuras se encuentran disponibles en la plataforma Openquake, el cual es un sitio web que pertenece a la fundación GEM, que es una asociación público-privada sin fines de lucro que impulsan desarrollos científicos y tecnológicos que

permiten una adecuada evaluación del peligro y facilitan la aplicación de planes de gestión de riesgo en todo el mundo.

Determinación de matrices de probabilidad

Las matrices de probabilidad de daño son otra forma de relacionar la intensidad sísmica con los estados de daño. Estas se obtienen restando los puntos de las curvas que delimitan un estado de daño para una intensidad dada, la expresión utilizada para determinarla se presenta en la Ecuación 3.7.10. Las matrices expresan la probabilidad de obtener un determinado nivel de daño, dicho de otra manera expresan la probabilidad de estar en el daño. Por ejemplo en la figura se observa que para una aceleración de “0.5g”, la probabilidad de que esta estructura presente una daño completo será de un 30 %. El 16 % de viviendas de este tipo sufrirían un daño severo, en 40 % daño moderado y solo el 11 % leve ante la misma intensidad.

$$Pr_{[E=i]} = Pr_{[E>i]} - Pr_{[E>i-1]} \quad (3.7.10)$$

Donde:

$Pr_{[E>i]}$ → Es la probabilidad de estar o exceder un daño.

$Pr_{[E=i]}$ → Es la probabilidad de estar en un daño.

$i = 1, 2, 3 \dots N_d$ → Representan los estados de daño.

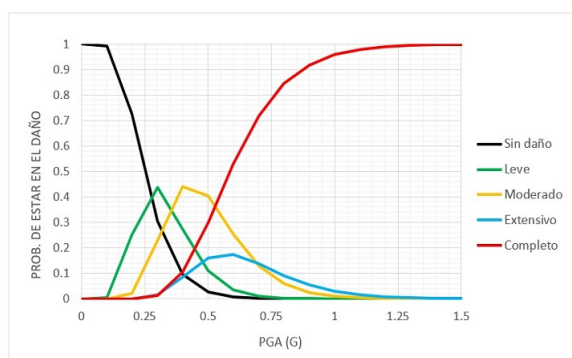


Figura 3.28: Matriz de probabilidad para vivienda de albañilería de un un piso (tipología “ALB-1”)

Fuente: Propia

Determinación de función de vulnerabilidad estructural

El cálculo de valor esperado de daño se obtiene multiplicando la probabilidad de ocurrencia de un estado de daño con el factor de daño para cada uno de los valores de *PIS*, la expresión utilizada para determinarla se presenta en la Ecuación 3.7.11.

$$E(L) = \sum_{n=1}^{n=N_d} Pr_{[E=i]} \beta_e \quad (3.7.11)$$

Donde:

$Pr_{[E=i]}$ es la probabilidad de estar en un daño, β_e es el daño relativo en cada estado de daño y la sumatoria indica que se consideran todos los estados de daño.

El daño relativo o factor de daño representa la relación entre el costo de reparación y el costo de reposición (reemplazo total) de la estructura. Los valores mostrados en la Tabla 3.12 son los recomendados por (Lovon, 2017) y que han sido utilizados en la presente investigación.

Tabla 3.12: Factores de daño en viviendas

Tipo de ocupación	Estados de daño			
	Leve	Moderado	Severo	Colapso
Vivienda	2.0 %	10.0 %	44.7 %	100.0 %

Fuente: Adaptado de (Lovon, 2017, p.64)

Por ejemplo a partir de esa tabla, podríamos afirmar que para reparar una vivienda que ha sufrido daño severo el costo de reparación equivale al 44.7 % del costo de reposición.

Finalmente con base a la metodología mostrada en la presente sección, se estimaron funciones de vulnerabilidad para las tipologías “ALB-1”, “ALB-2” y “ADOB”. En la Figura 3.29 se puede observar que la curva correspondiente a la tipología “ALB-1” tiene la ordenada casi nula hasta los 180 gals, para esta intensidad el porcentaje de daño de la tipología “ADOB” presenta un nivel de daño del 17 %; para el caso de tipología “ALB-2” los valores de daño se conservan nulos hasta un poco mas de los 300 gals. También se observa que la tipología “ADOB” es mas vulnerable respecto a las otras tipologías, ya que para intensidades relativamente bajas, esta presenta mayores porcentajes de daños. Finalmente se puede argumentar que, las tres tipologías tienen un tipo de falla frágil, ello debido al cambio casi abrupto de porcentajes daño entre valores de intensidades.

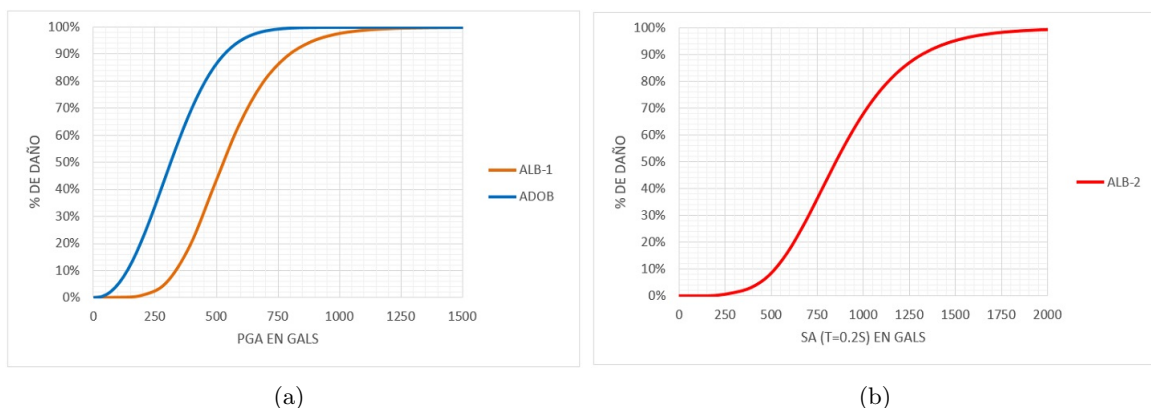


Figura 3.29: (a) Funciones de vulnerabilidad para viviendas de albañilería de un piso y viviendas de adobe ; (b) Funciones de vulnerabilidad para viviendas de albañilería de 2 y 3 pisos

Fuente: Propia

Función de vulnerabilidad a partir de la propuesta de Miranda

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 (ver Ecuación 3.7.12). (Palomino y Tamayo, 2016)

Con base a este modelo teórico se definió la función de vulnerabilidad para la tipología

“ALB-3” el cual abarca viviendas de albañilería confinada de 4 a 6 pisos.

$$E\left(\frac{L}{\gamma_i}\right) = 1 - 0.5^\theta; \theta = \left(\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}\right)^\rho \quad (3.7.12)$$

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. $E\left(\frac{L}{\gamma_i}\right)$ 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. La distorsión máxima de entrepiso de cada tipología, γ , se estima a partir de la aceleración espectral.

Curvas de capacidad y espectros de capacidad

La metodología descrita en esta sección es la descrita en HAZUS (FEMA, 2003) 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 (Sd) y la aceleración espectral (Sa), utilizando las Ecuaciones 3.7.13 y 3.7.14 (ver Figura 3.30). 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). (Palomino y Tamayo, 2016)

$$Sa = \frac{V_b}{\alpha_1}; \alpha_1 = \frac{L^{*2}}{M^*} = \frac{(\sum m_i \phi_i)^2}{\sum m_i \phi_i^2} \quad (3.7.13)$$

$$Sd = \Delta_t \cdot \alpha_2; \alpha_2 = \frac{1}{\Gamma}; \Gamma = \frac{L^*}{M^*} = \frac{\sum m_i \phi_i}{\sum m_i \phi_i^2} \quad (3.7.14)$$

Donde V_b es la cortante basal, Δ_t 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 V_b entre la masa M del edificio para obtener el espectro de capacidad.

Las curvas de capacidad en formato $Sa - Sd$ pueden representarse de manera conveniente a partir de la determinación de los pares de valores (Dy, Ay) y (Du, Au) (Punto de fluencia (Yield Capacity) y Punto de comportamiento último (Ultimate Capacity), respectivamente) (Figura 3.30). Estos valores se calculan a partir de las Ecuaciones 3.7.15 y 3.7.16 (FEMA, 2003).

$$Ay = Sa_y = \frac{C_s \gamma}{\alpha_1}; Dy = Sd_y = \frac{Sa_y}{(2\pi/T)^2} \quad (3.7.15)$$

$$Au = Sa_u = Sa_y \lambda; Du = Sd_u = (\lambda \mu) Sd_y \quad (3.7.16)$$

Donde C_s es el coeficiente de diseño sísmico (fracción del peso del edificio), T es el periodo estructural elástico, γ_t 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).

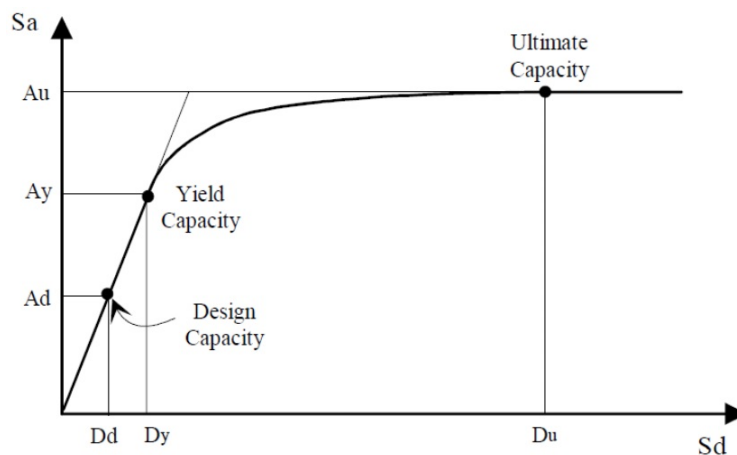


Figura 3.30: Ejemplo de espectro de capacidad de un edificio (FEMA, 2003)

Fuente: Adaptado de (Palomino y Tamayo, 2016, p.47)

Para el caso de la tipología “ALB-3”, fue construido un modelo curva capacidad a partir de parámetros propuestos por HAZUS (FEMA, 2003) para una estructura con código RM2M-LC, que consiste en un edificio de mampostería reforzada de bajo o nulo nivel de diseño sísmico, con diafragma rígido, de 4 a 7 pisos de altura. En la Figura 3.31 se muestra el modelo curva capacidad en formato $Sa - Sd$ generada a partir de los valores de la Tabla 3.13 y las Ecuaciones 3.7.15 y 3.7.16.

Tabla 3.13: Parámetros para curva capacidad - Edificio tipo RM2M-LC

RM2M-LC
$C_s = 0.067$
$T = 0.56$
$\alpha_1 = 0.75$
$\alpha_2 = 0.75$
$\gamma_t = 1.25$
$\lambda = 2$
$\mu = 3.3$
$\rho = 2.3$

Fuente: Adaptado de (FEMA, 2003)

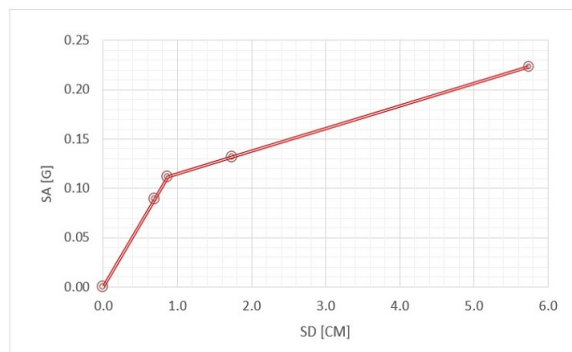


Figura 3.31: Curva de capacidad en formato $Sa - Sd$ (RM2M-LC)

Fuente: Propia

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, 2010):

1. Punto de fluencia (Yield Capacity): daño nulo (0 %)
2. 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 3.7.13 y 3.7.14. (Palomino y Tamayo, 2016)

A partir de la sectorización del modelo curva capacidad de la tipología RM2M-LC (ver Figura 3.31), se obtienen valores de $Sa_{50\%}$ y $Sd_{50\%}$ (aceleración y desplazamiento espectral asociados a una pérdida del 50 % de valor total del inmueble) de 0.17g y 3.31cm respectivamente. Seguidamente utilizando ($Sa_{50\%}$) y la Ecuación 3.7.17 se obtiene $\bar{\gamma}$, que resulta una distorsión de 0.004.

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). Esta permite determinar el valor de distorsión máxima de entrepiso (γ) a partir de la aceleración espectral (Sa), utilizando la Ecuación 3.7.17. (Palomino y Tamayo, 2016)

$$\gamma = \frac{\beta_1 \beta_2 \beta_3 \beta_4 T^2}{4\pi^2 H} Sa \quad (3.7.17)$$

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

1. 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 compor-

tamiento elástico lineal. Este factor depende del tipo estructural y del número de pisos de la estructura.

2. 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).
3. 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.
4. 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

La determinación de los parámetros β_1 , β_2 , β_3 y β_4 , se calculan a partir de la solución a una ecuación diferencial que describe un sistema acoplado compuesta de viga de corte y otro de flexión, sometida a una carga lateral que varía en a altura. (Miranda, 1997) presenta una serie de ecuaciones para estimarlas, las mismas que, como ya se mencionaron dependen de las características propias de la estructura. En la Tabla 3.14 se presentan los factores empleados para obtener la distorsión máxima de un edificio tipo RM2M-LC. Donde h es la altura de entrepiso de la edificación y α es un parámetro adimensional que mide el grado de participación de deformaciones laterales de corte y flexión.

Tabla 3.14: Parámetros de Miranda

$h = 2.7$ m
$H = 13.5$ m
$\alpha = 2$
$\beta_1 = 1.36$
$\beta_2 = 1.22$
$\beta_3 = 1.08$
$\beta_4 = 1.15$

Fuente: Propia

Determinación de función de vulnerabilidad estructural

Con el cálculo de γ , es posible estimar el daño esperado para diferentes valores de intensidad (Sa). Reemplazando γ (Ecuación 3.7.17) en la Ecuación el daño esperado puede quedar en función de Sa con la (Ecuación 3.7.18).

$$E(L/Sa) = 1 - 0.5^\theta; \theta = \left(\frac{\beta_1 \beta_2 \beta_3 \beta_4 T^2}{4\pi^2 H} Sa \right)^\rho \quad (3.7.18)$$

De esta manera, es posible calcular el daño esperado $E(L|Sa)$ para cada valor de Sa , y construir las funciones de vulnerabilidad de cada tipología. El valor de la intensidad Sa se obtiene directamente a partir del archivo de peligro AME (ver Sección 3.7.2).

Finalmente con base a la metodología mostrada en la presente sección y considerando los parámetros ya descritos, se determina la función de vulnerabilidad para la tipología “ALB-3”. En la Figura 3.32 se puede observar que la curva correspondiente a la tipología “ALB-3”

tiene la ordenada casi nula hasta los 50 gals, la cual es similar a la descrita para la tipología “ADOB” 3.29. Sin embargo no se puede realizar una adecuada comparación entre ambas tipologías debido a que éstas tienen diferentes PIS, lo que si se puede afirmar es que ambas tipologías tienen un comportamiento frágil.

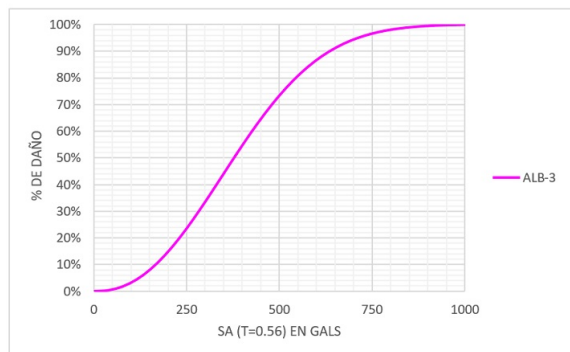


Figura 3.32: Función de vulnerabilidad para viviendas de albañilería de 4 a 7 pisos

Fuente: Propia

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) (ver Ecuación 3.7.19). Se utilizan los parámetros propuestos por CAPRA (ERN, 2010) para el cálculo de las Ecuaciones 3.7.19 y 3.7.20. Dichos parámetros fueron obtenidos a partir de ejercicios de simulación donde se suponen estructuras simples con propiedades aleatorias.

$$SD^2(L|Sa) = Q[E(L|Sa)]^{r-1}[1 - E(L|Sa)]^{s-1} \quad (3.7.19)$$

$$Q = \frac{SD_{\text{máx}}^2}{L_0^{r-1}(1 - L_0)^{s-1}}; s = \frac{r - 1}{L_0} - r + 2 \quad (3.7.20)$$

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

3.7.5. Estimación del riesgo

Con base en los modelos de amenaza, exposición y vulnerabilidad, es posible estimar un modelo de riesgo probabilista. Para calcular las pérdidas el porcentaje de daño obtenido del modulo de vulnerabilidad, es traducido a pérdidas económicas multiplicándolo por el valor de reposición del bien en riesgo, operación que se repite para cada tipo de activo, en cada localización, para después integrar las pérdidas según lo requerido. El resultado es una medida del riesgo que permite a las entidades encargadas de la toma de decisiones, contar con información esencial para la gestión de riesgos futuros. (ERN, 2010)

En esta sección se muestran los fundamentos técnicos de tres medidas de cuantificación del riesgo, los cuales fueron empleadas en la presente investigación para la presentación de resultados: Pérdida por escenario, PAE y PML. Estas medidas siguen el procedimiento analítico propuesto por (Ordaz *et al.*, 2000), que es el mismo implementado en la plataforma

CAPRA. También se presenta la metodología para realizar el análisis de riesgo usando la plataforma CAPRAGIS. Se usará toda la información recolectada en gabinete y procesada, además los archivos de amenaza y efectos de sitio existentes.

3.7.5.1. Parámetros de cuantificación del riesgo

El riesgo sísmico puede expresarse en términos de pérdidas económicas probables, a continuación se describen tres medidas de riesgo:

Pérdida anual esperada (PAE)

Se define como la esperanza de la pérdida que se tendría en un año cualquiera, suponiendo que el proceso de ocurrencia de sismos es estacionaria y que las estructuras dañadas se les restituye su resistencia inmediatamente después de un sismo. La pérdida anual esperada es también conocida como “prima pura de riesgo”, puesto que de cobrarse tal valor de prima en un sistema simple de seguro, se tendría, a largo plazo, un equilibrio entre primas cobradas y pérdidas pagadas. Matemáticamente, PAE se define con la Ecuación 3.7.21. (Cardona *et al.*, 2011)

$$PAE = \sum_{i=1}^{Ns} ESL_i F_{Ai} \quad (3.7.21)$$

Donde, Ns es el número de escenarios que afecta la cartera, ESL_i es el valor de la pérdida esperada debido al escenario i y F_{Ai} es la frecuencia anual de ocurrencia del escenario i .

Pérdida máxima probable (PML)

Se trata de una pérdida que ocurre poco frecuentemente, es decir, que está asociada a un periodo de retorno muy alto (o, alternativamente, a una tasa de excedencia muy baja). No existen estándares universalmente aceptados para definir qué quiere decir “poco frecuentemente”. De hecho, la elección de un periodo de retorno u otro para tomar cierta decisión depende de la prevención al riesgo de quien la está tomando (ERN, 2010). Por ejemplo en el Perú, la Superintendencia de Banca y Seguros (SBS), establece como referencia el periodo de retorno de 1000 años para establecer las reservas estratégicas de las compañías de seguro que suscriben pólizas con coberturas por terremoto. El PML se calcula a partir de la tasa de excedencia de pérdidas que se muestra en la Ecuación 3.7.22.

$$\nu(p) = \frac{1}{TR} = \sum_{i=1}^{Ns} Pr(P > p/i) F_{Ai} \quad (3.7.22)$$

Donde, Ns es el número de escenarios que afecta la cartera, $\nu(p)$ es la tasa de excedencia de la pérdida p , $Pr(P > p/i)$ es la probabilidad de excedencia de la pérdida p , cuando ocurre el escenario i y F_{Ai} es la frecuencia anual de ocurrencia del escenario i .

Pérdida por escenario (ESL, por sus siglas en inglés)

El análisis probabilista de riesgo se realiza normalmente para el conjunto completo de escenarios especificados en el peligro sísmico. Sin embargo, si así se desea, el análisis puede realizarse para un solo escenario. Cada evento esta definido por una magnitud y la ubicación de su foco (sección 3.7.2). La pérdida esperada por escenario se estima mediante la Ecuación

3.7.23. (Palomino y Tamayo, 2016)

$$ESL_i = \sum_{j=1}^{Nb} ESL_{j,i} \quad (3.7.23)$$

Donde, $ESL_{j,i}$ es el valor esperado de la pérdida de la edificación j debido a la ocurrencia del escenario i , Nb es el conjunto de edificaciones afectados por el escenario i .

El valor esperado $ESL_{j,i}$ se puede estimar mediante el teorema de la probabilidad total (Ecuación 3.7.24).

$$ESL_{j,i} = \sum_I V_j(I) Pr_{i,j}(I) \quad (3.7.24)$$

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 GMPE (sección 3.7.2).

3.7.5.2. Metodología para el cálculo de las pérdidas probables

Se utilizará el software CAPRA para ingresar la información de peligro, vulnerabilidad y exposición. El programa permite la estimación de conjuntos o carteras de bienes inmueble considerando su ubicación geográfica, y empleando información sobre la amenaza y la vulnerabilidad estructural.

Es un sistema desarrollado en un ambiente de Sistema de Información Geográfica, por lo que la información de ubicación está implícita en la posición espacial que el elemento ocupa y que se despliega en la pantalla GIS.

Los archivos requeridos por el programa CAPRAGIS como datos de entrada son:

- Archivo de amenaza: Este archivo se llama “mapaTotal2_Paramétrico.AME” el cual contiene todos los escenarios posibles y sus respectivas frecuencias de ocurrencia, este archivo es generado por el módulo CRISIS 2007.
- Archivo de Exposición: Este archivo se llama “Ayac_viv.shp” el cual contiene la localización, caracterización, tipología y valoración económica de cada edificio analizado.
- Archivo de microzonificación: Este archivo se llama “microzonificación_ayacucho.ft” y contiene los efectos de sitio de la zona en estudio.
- Un archivo en formato (*.DAT) con nombre “FV_Vivienda” el cual contiene los nombres de las funciones de vulnerabilidad empleadas en el análisis.
- Un archivo en formato (*.fvu) el cual contiene la totalidad de funciones de vulnerabilidad empleadas con relaciones intensidad versus daño.

Los pasos para realizar un correcto análisis de riesgo en el software CAPRAGIS son los siguientes:

Ingreso de base de datos

El ingreso de base de datos de vivienda se hace mediante mediante el archivo de extensión (*.shp), las características y descripciones de los campos en ella se especifica en la sección 3.7.3.7. En la Figura 3.33 se muestra la pantalla CAPRA con la visualización de las viviendas en el distrito de Ayacucho.

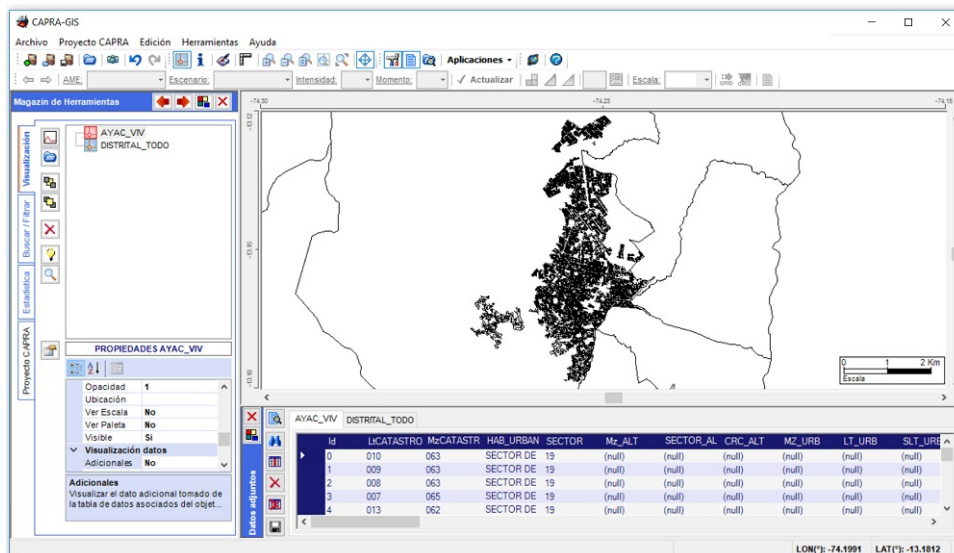


Figura 3.33: Visualización del archivo exposición en CAPRAGIS

Fuente: Propia

Ingreso de datos de amenaza sísmica

El ingreso de datos de amenaza se hace mediante un archivo de extensión (*.AME), la descripción de ese archivo se presenta en la sección 3.7.2.5. En la Figura 3.34 se muestra la representación típica en CAPRA de uno de los escenarios sísmicos del archivo de amenaza.

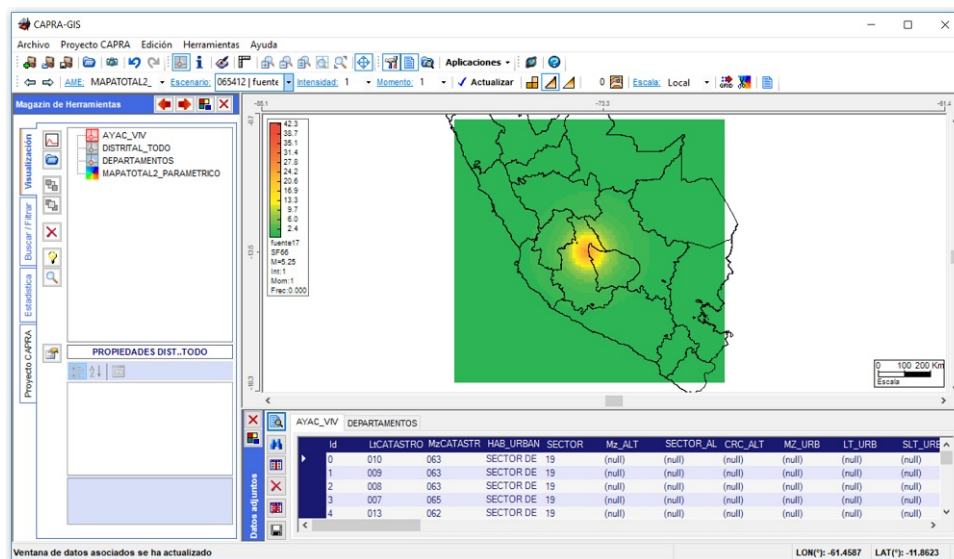


Figura 3.34: Visualización del archivo amenaza en CAPRAGIS

Fuente: Propia

Es necesario también ingresar los datos de la microzonificación en caso de que se tuviera, esto se hace mediante un archivo de extensión (*.ft). La Figura 3.35 muestra una vista de pantalla del CAPRA, en el cual se distinguen de manera gráfica las distintas microzonas de los suelos en el distrito de Ayacucho (ver sección 3.7.2.7).

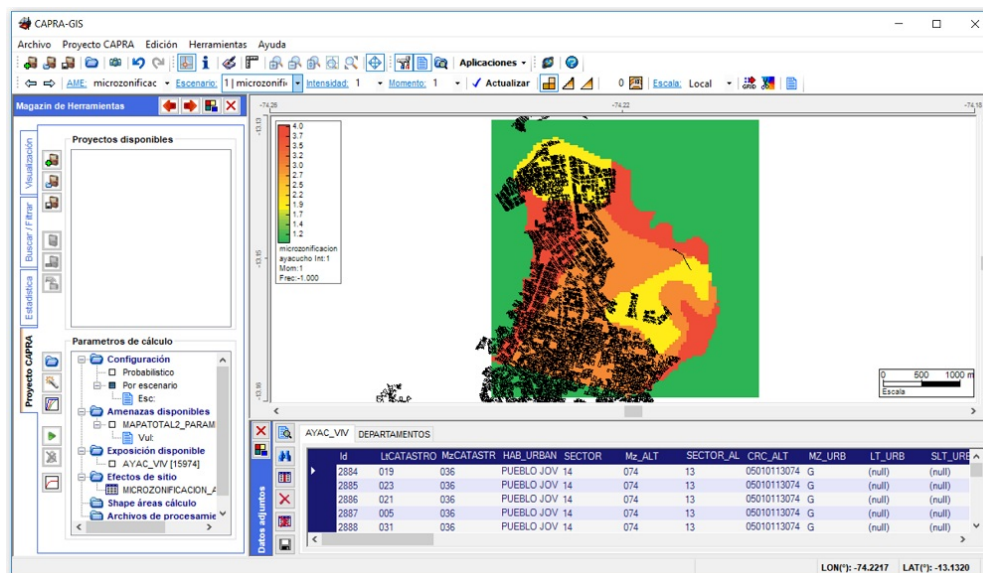


Figura 3.35: Visualización del archivo microzonificación en CAPRAGIS

Fuente: Propia

Ingreso de datos de vulnerabilidad

Cada elemento en la base de datos tiene asociado una clasificación y una función de vulnerabilidad con la cual es posible determinar la distribución de pérdidas dicho elemento ante cualquier escenario de cálculo.

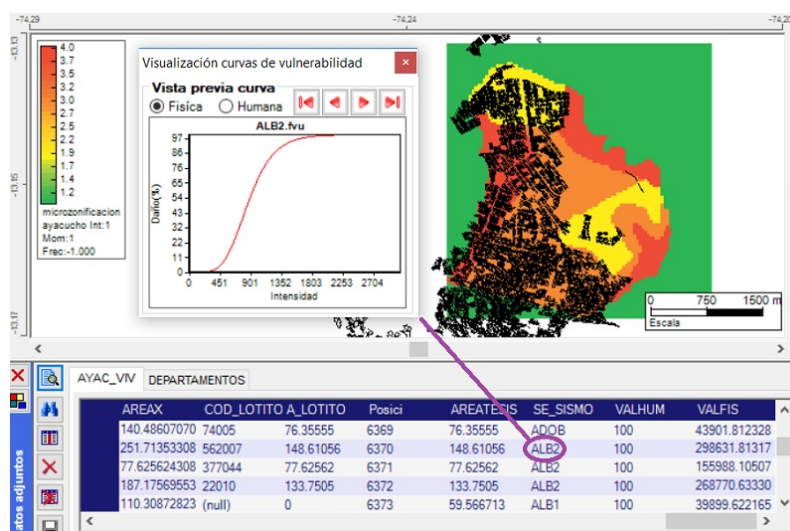


Figura 3.36: Vista parcial del programa CAPRA, que muestra el campo donde se define la función de vulnerabilidad

Fuente: Propia

La información sobre estas funciones de vulnerabilidad, íntimamente ligadas a los sistemas estructurales, se encuentra en el campo SE_SISMO que debe estar incluido en la base de datos de exposición (ver Figura 3.36), en donde además se incluye el valor de la desviación estándar de la función de vulnerabilidad en cada nivel de intensidad.

Cálculo y obtención de pérdidas probables

Una vez ingresada la información de peligro, vulnerabilidad y la base de datos se estiman las pérdidas probables y el PML. En la Figura 3.37 se muestra la curva PML obtenida para la cartera de viviendas.

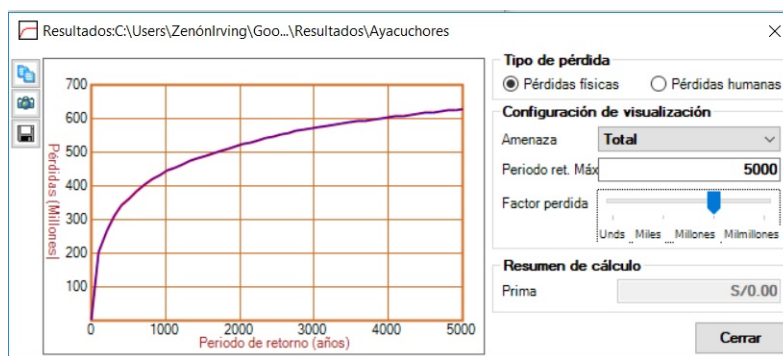


Figura 3.37: Cálculo de PML con software CAPRA

Fuente: Propia

El software permite obtener los valores calculados de la pérdida anual esperada para cada elemento que forma parte de la base de datos. Los atributos que se asignan a este resultado son: PF_T1(TOT) y PRF_T1(TOT), estos valores significan la pérdida anual esperada en unidades monetarias y la pérdida anual esperada relativa al valor físico del elemento respectivamente. Dichos resultados se guardan en un archivo en formato (*.shp) y también pueden visualizarse por intensidades de colores en la ventana principal de CAPRAGIS (ver Figura 3.38).

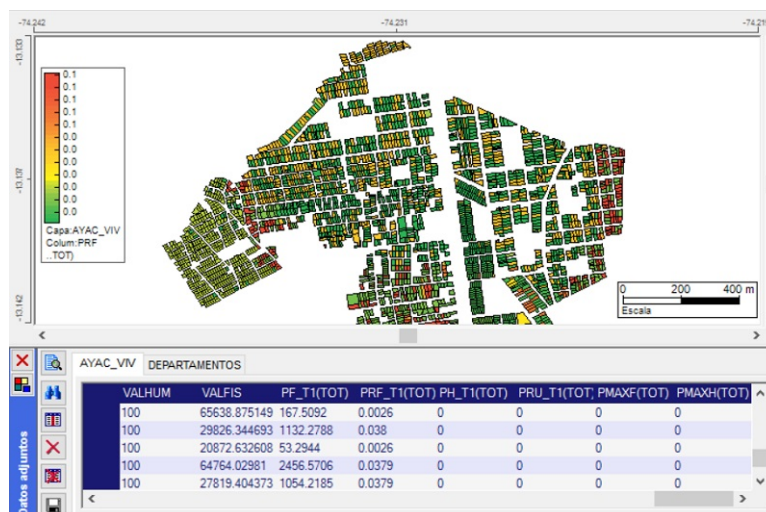


Figura 3.38: Mapeo de pérdidas relativas en CAPRAGIS para un área de viviendas del distrito de Ayacucho

Fuente: Propia

El sistema también permite obtener los resultados de pérdida probables desagregados por escenarios. La información que brinda el sistema para cada escenario es su frecuencia el valor esperado y varianza de la pérdida debido a ese escenario, y los parámetros a y b de la distribución beta que se ajusta a la variable aleatoria. También se reporta la frecuencia del escenario y el valor expuesto para cada escenario.

Capítulo 4

RESULTADOS

4.1. Análisis e interpretación

En esta sección se presentan los principales resultados de la evaluación probabilista del riesgo sísmico de viviendas en el distrito de Ayacucho. El escenario analizado para los resultados de ESL es el mostrado en la Sección 3.7.2.6 (Figura 3.14), que es el que más contribuye (en otras palabras, el más probable) a que las intensidades en la ciudad tenga un periodo de retorno de 475 años. Los mapas con resultados de riesgo del distrito de Ayacucho se muestran en el Anexo B.

4.1.1. Resultados de PAE y ESL

En la Tabla 4.1 muestra la PAE total acumulada, el cual es del orden de 26.5 millones de soles, que corresponde al 1.2 % del valor total de reposición, que es un valor de PAE moderado. La Tabla 4.2 muestra los resultados de PAE por material de construcción y tipología constructiva. La tipología con mayores pérdidas es la de adobe “ADOB”, seguida por la tipología “ALB3” que describen viviendas de albañilería de 4 a más niveles. Finalmente las tipologías con menores pérdidas son “ALB1” y “ALB2” que engloban a viviendas de uno a tres niveles. Por otro lado la Tabla 4.3 muestra que el valor de ESL total es de 32 millones de soles, que equivale al 1.5 % del valor total de reposición. El máximo valor de ESL también lo experimenta la tipología “ADOB”, y la distribución de pérdidas sigue un orden similar al de los valores de PAE de cada tipología constructiva.

Tabla 4.1: PAE total cartera viviendas Ayacucho

#	15974
Valor expuesto	S/2,153,648,834
PAE	S/26,498,137
%	12.30

Fuente: Propia

Tabla 4.2: PAE por tipología constructiva

Material de construcción	Tip. const.	Edificios		Valor expuesto		PAE	
		#	%	S./	%	S./	%
Adobe	ADOB	5692	35.6	373,064,511	17.3	14,593,599	39.1
	ALB1	3124	19.6	212,263,929	9.9	1,094,725	5.2
Albañilería	ALB2	6831	42.8	1,408,132,096	65.4	6,967,803	4.9
	ALB3	327	2.0	160,188,297	7.4	3,842,010	24.0
Sub total		10282	64.4	1,780,584,323	82.7	11,904,538	6.7
Total		15974	100.0	2,153,648,834	100.0	26,498,137	12.3

Fuente: Propia

Tabla 4.3: ESL por tipología constructiva

Material de construcción	Tip. const.	Edificios		Valor expuesto		ESL (Mw=5.5)	
		#	%	S./	%	S./	%
Adobe	ADOB	5692	35.6	373,064,511	17.3	12,658,897	3.4
	ALB1	3124	19.6	212,263,929	9.9	2,636,857	1.2
Albañilería	ALB2	6831	42.8	1,408,132,096	65.4	14,114,507	1.0
	ALB3	327	2.0	160,188,297	7.4	2,706,304	1.7
Sub total		10282	64.4	1,780,584,323	82.7	19,457,669	1.1
Total		15974	100.0	2,153,648,834	100.0	32,116,565	1.5

Fuente: Propia

En general los resultados demuestran que hay un universo de viviendas como son la tipología ADOB y ALB3 que concentran los mayores riesgos. Esto en sí mismo no es una novedad, debido a que en general éstos tipos de vivienda han sido construidas de manera muy precaria y si a eso le agregamos la alta vulnerabilidad debido al elevado peso de la estructura, tenemos viviendas con alto riesgo. Otro universo de viviendas lo constituyen las tipologías ALB1 y ALB2, estas concentran pérdidas algo bajas, ello es el reflejo que la zona en estudio es una zona de relativamente baja sismicidad, ya que los eventos que se generan no llegan a producir intensidades altas tan frecuentemente. En esas condiciones a pesar de tener construcciones de tipo informal y más aun cuando éstas se encuentren en suelos sin tanta amplificación los valores de riesgo son un tanto bajas.

Como acotación adicional se puede afirmar que investigaciones como (Santa-Cruz, 2013; Palomino y Tamayo, 2016) obtienen como resultados a la tipología adobe como una de las que concentran mayores pérdidas (49.4% y 51% respectivamente), dichos valores siguen las tendencias elevadas a lo encontrado en la presente investigación (39.1%), vale aclarar que dichas investigaciones se han realizado en una zona de mayor sismicidad.

La Tabla 4.4 muestra los resultados de PAE y ESL por tipo de suelo. La mayor parte de las viviendas (42.1%) no tienen asignado un valor de amplificación en suelo, el 30.9% se encuentran ubicados en suelo S2 (amplificación moderada), el 14.6% y 12.4% sobre suelos S3 y S1 respectivamente (amplificación alta y baja). Las mayores pérdidas de PAE Y ESL corresponden a viviendas que se encuentran en suelos de tipo S3.

Tabla 4.4: PAE y ESL por tipo de suelo

Suelo	Edificios		PAE		ESL (Mw=5.5)	
	#	%	S./	‰	S./	%
S1 (1.5)	1987	12.4	2,075,309	9.2	2,466,887	1.1
S2 (2)	4928	30.9	14,026,484	14.4	17,768,058	1.8
S3 (2.5)	2340	14.6	5,765,597	22.0	7,512,220	2.9
No asignado	6719	42.1	4,630,747	6.7	4,369,400	0.6
Total	15974	100.0	26,498,137	12.3	32,116,565	1.5

() Valor de amplificación en suelo

Fuente: Propia

4.1.2. Resultados de PML

La curva PML y los valores para diferentes periodos de retorno (T) se muestran en la Tabla 4.5 y la Figura 4.1. Si tomamos como referencia para el PML, los 1000 años de periodo de retorno (tal como lo establece la SBS en la resolución N° 1305-2005 acerca de la constitución de reservas catastróficas en compañías de seguros) la pérdida en la cartera viviendas será del orden de 436 millones, que representa el 20.3% del total expuesto. Esto quiere decir que un evento puede producir pérdidas del orden de 20.3% en promedio cada 1000 años, lo que de ninguna manera implica que ese sea el tiempo que se deba esperar para ello ocurra, ese evento puede presentarse en cualquier momento.

Tabla 4.5: PML para diferentes periodos de retorno

T (años)	PML (%)	PML (S/.)
50	6.6	143,210,345
100	9.2	198,225,494
200	12.2	262,311,158
500	16.4	353,853,256
1000	20.3	436,788,449
2000	23.5	505,290,065

Fuente: Propia

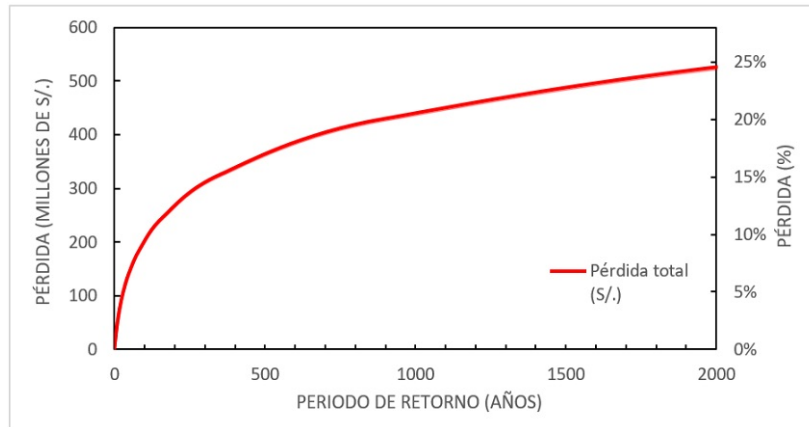


Figura 4.1: Curva PML para viviendas del distrito de Ayacucho

Fuente: Propia

Capítulo 5

CONCLUSIONES

5.1. Conclusiones

- La mayor parte de los estudios existentes consideran como “postulado de escenario” a determinados valores de aceleración que resultan de un análisis de peligro sísmico completo, además no contemplan las variaciones de intensidades sobre los datos expuestos a medida que estos se alejan del epicentro.
- Se ha empleado como modelo de amenaza el estudio desarrollado por el IGP, el cual incluye información de eventos muy actualizada, por lo que se puede considerar que por el momento es uno de los modelos más precisos. No obstante esto, se debe considerar una actualización del modelo de peligro sísmico luego de que ocurra un sismo de gran intensidad.
- Se ha logrado sistematizar la base de datos vivienda en SIG, ella va permitir actualizar y mejorar a calidad de información, en medida que se tengan nuevos valores y datos catastrales.
- Los resultados demuestran que las construcciones con las mayores concentraciones de riesgos son las viviendas de adobe, seguidas de construcciones de albañilería de 4 a mas niveles. Por otro lado las construcciones con menores riesgos son las viviendas de albañilería de 1 a 3 niveles.
- Se definieron funciones de vulnerabilidad para cada tipología estructural sustentada en la base de datos de vivienda con base en el número de pisos, el sistema estructural y factores agravantes como la falta de supervisión técnica.
- La PAE total acumulada es del orden de 26.5 millones de soles, que corresponde al 12% del valor total de reposición. En el sector asegurador este monto es equivalente al valor de la prima de seguro anual para protección contra terremotos. En comparación con los valores del mercado del sector asegurador peruano (2 y 3 ‰), el valor obtenido resulta algo alto y poco competitivo.
- La estimación de ESL puede ser muy razonable para temas de prevención y mitigación de riesgo, siempre y cuando el escenario definido sea uno factible (escenario probable).
- El PAE y PML son indicadores orientados a la gestión financiera del riesgo, poseen un poco mas de sentido que el ESL, ya que se encuentran definidos con criterios mas rigurosos, pues estos consideran en su análisis no un solo evento sino a un conjunto completo de posibles eventos.

- Se pudo notar que los valores de PAE y ESL aumentan notoriamente en la medida que se disminuye la calidad del suelo, por tanto resulta evidente que el tipo de suelo es determinante en el cálculo de ambos indicadores.
- Los indicadores permiten optimizar recursos y plantear medidas de mitigación como intervenciones y reforzamientos futuras en focos donde se denotan altas concentraciones de riesgo.
- Los indicadores son muy útiles para las autoridades que administran el dinero pues les permite conocer el tamaño del impacto de las pérdidas, a partir de ella gestionar y buscar recursos (entablar comunicación con el gobierno central) para atender las emergencias que pudiesen presentarse.
- Los resultados de la PAE Y ESL permiten generar mapas de riesgo con resolución de edificio por edificio, el cual permite una visualización de la distribución geográfica de las pérdidas futuras. Los resultados pueden actualizarse cada vez que se dispongan de nueva información relacionado a la amenaza, las zonas de microzonificación y una base de datos expuestos mas detallada.
- 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.

5.2. Recomendaciones

- Realizar estudios de microzonificación que abarquen y engloben otras zonas del distrito de Ayacucho, subsanar esta deficiencia tendrá indudablemente un impacto en las futuras investigaciones de riesgo.
- Un aspecto que puede mejorar los estudios de microzonificación existentes es la definición de funciones de amplificación espectral para cada tipo de suelo, pues se ha demostrado que esta función es en general variable con el periodo estructural.
- Se recomienda realizar un inventario más detallado de las tipologías de sistemas constructivos y determinar funciones de vulnerabilidad que puedan emplearse en estimaciones probabilistas del riesgo. Estos aportes contribuirán a actualizar la normativa de diseño sismoresistente del país.
- Aplicar otras metodologías similares en la evaluación del riesgo para comparar los resultados obtenidos. Esto permitirá determinar los pros y contras entre cada una de ellas.
- Se recomienda realizar reforzamientos estructurales de las edificaciones, priorizando aquellas que presenten mayores Pérdidas Anuales Esperadas, tanto en términos de cuantía como en porcentaje del valor de la edificación. En el caso de viviendas de albañilería, las propuestas de reforzamiento deben garantizar una buena densidad de muros confinados en las direcciones longitudinal y transversal, y la presencia de diafragmas rígidos unidos a los muros confinados. Mientras que en construcciones de adobe el reforzamiento puede consistir en el uso mallas de cuerdas tensadas y anudadas manualmente a los muros de la estructura.

- En el caso de la ciudad de Ayacucho existen zonas altas concentraciones de riesgos, como es el caso de construcciones emplazadas en las laderas del cerro “La Picota”, donde afloran depósitos conglomeráticos de naturaleza granular e inestables en pendientes fuertes quienes determinan altos valores de amplificación sísmica. En esta zona se recomienda la reubicación de las construcciones a lugares con mejores condiciones físico mecánicas del terreno, ello debe realizarse en coordinación a las autoridades locales.
- Reglamentar y reforzar la supervisión y control de calidad durante la construcciones.

5.3. Futuras líneas de investigación

- Diseñar un esquema integral de cobertura que apliquen estrategias de gestión financiera del riesgo que permitan al gobierno local estar prevenidos y atender las necesidades que se puedan presentarse ante algún evento sísmico.
- Realizar análisis beneficio costo para establecer una priorización de intervenciones en diferentes componentes o para definir las obras de intervención a realizar. Esto permitirá una programación racional de las inversiones en mitigación y reducción de riesgos.

Referencia Bibliográfica

- (1985). *Earthquake Damage Evaluation Data for California (Report ATC-13)*. Applied Technology Council, Redwood City.
- (2003). *HAZUS-MH MR4. Multi-hazard loss estimation methodology: earthquake model. Technical Manual*. Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- (2003). *INDECI-PERÚ. Mapas de peligros de la ciudad de Ayacucho, informe principal*. Proyecto INDECI-PNUD PER/02/051 Ciudades Sostenibles, Perú.
- (2005). *Bases técnicas para la estimación de pérdidas con fines de seguros de terremotos*. Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres, Lima.
- (2006). *Evaluación de la vulnerabilidad física y social*. Atlas Nacional del Riesgo, Mexico, D.F.
- (2007). *Niveles socioeconómicos 2007-2008*. Asociación Peruana de Empresas de Investigación de Mercado, Lima-Perú.
- (2008). *Censos Nacionales 2007: XI de Población y VI de Vivienda*. INEI, Lima.
- (2010). *Informe Técnico zonificación sísmico-geotécnico para siete distritos de Lima Metropolitana (Comportamiento dinámico del suelo)*. Instituto geofísico del Perú, Lima-Perú.
- (2010). *Metodología de análisis probabilista de riesgos. En: Central America Probabilistic Risk Assessment (CAPRA)*. Evaluación de Riesgos Naturales - América Latina (ERN-AL), Mexico, D. F.: Banco Mundial y Banco Interamericano de Desarrollo (BID).
- (2012). *Modelación probabilista del riesgo sísmico para la ciudad de David*. Comprehensive Approach for Probabilistic Risk Assessment, Panamá.
- (2012). *Perú: Gestión de Riesgo de Desastre en Empresas de Agua y Saneamiento. Tomo I: Perfil de Riesgo Catastrófico, Medidas de Mitigación y Protección Financiera. Caso Sedapal y Emapica*. Water and Sanitation Program, Lima, Perú.
- (2014a). *Metodología propuesta para la obtención del perfil de riesgo sísmico para los bienes inmuebles de propiedad del estado y viviendas*. Consorcio CIRNA-PUCP, Contrato No. F-0020-12295.
- (2014b). *Perfil de riesgo sísmico a nivel nacional de los bienes inmuebles de propiedad del Estado y viviendas*. Consorcio CIRNA-PUCP, Contrato No. F-0020-12295.
- (2014). *Re evaluación del peligro sísmico probabilístico para el Perú*. Instituto geofísico del Perú, Lima-Perú.

- (2017). *Actualización del escenario por sismo, tsunami y exposición en la región cenral del Perú*. Instituto geofísico del Perú, Lima-Perú.
- (2017). *Niveles socioeconómicos 2017*. Asociación Peruana de Empresas de Investigación de Mercado, Lima-Perú.
- Asenjo, S. I., Fernandez, C. I., y Montero, J. C. (2006). Análisis del riesgo sísmico en zonas urbanas mediante sistemas de información geográfica: aplicación a la ciudad de granada. *cuadernos geográficos de la universidad de granada*. *Cuadernos geográficos de la Universidad de Granada*, 39(2), 147-166.
- Benito, B. y Cabañas, L. (1999). Peligrosidad sísmica. *Física de la tierra*, (11), 13-47.
- Bonett Díaz, R. L. (2003). *Vulnerabilidad y riesgo sísmico de edificios. Aplicación a entornos urbanos en zona de amenaza alta y moderada*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña.
- Calvi, G. M., Pinho, R., Magenes, G., Bommer, J. J., Restrepo, L. M., y Crownley, H. (2006). Development of seismic vulnerability assessment methodologies over the past 30 years. *Engineering structures*, 273, pp. 397-409.
- Cardona, O. (2001). Estimación holística del riesgo sísmico utilizando sistemas dinámicos complejos. Tesis de máster, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
- Cardona, O. D., Ordaz, M. G., Reinoso, E., Yamín, L. E., y Barbat, A. H. (2012). Comprehensive approach to probabilistic risk assessment: International initiative for risk management effectiveness - capra. *Lisboa, World Conference on Earthquake Engineering (WCEE)*.
- Cardona, O. D., Ordaz, M. G., Reinoso, E., Yamín, L. E., y H., B. A. (2011). Enfoque integral para la evaluación probabilista del riesgo (capra): Iniciativa internacional para la efectividad de la gestión del riesgo de desastre. *4º Conferencia Nacional de Ingeniería Sísmica*.
- Castillo, J. y Alva, J. (2009). Peligro sísmico en el Perú. Tesis para optar el Título de Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Ingeniería.
- Chura, E. (2012). Evaluación y propuesta de un plan de gestión del riesgo de origen sísmico en el distrito de ciudad nueva - tacna. Tesis de máster, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann.
- Cornell, A. (1968). Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 585, pp. 1583-1606.
- Coronel, G. y López, O. (2015). Metodología para la estimación de daños por sismos en edificios escolares de venezuela mediante curvas de fragilidad. *Revista de la Facultad de Ingeniería U.C.V., Vol. 30, N° 2, pp. 159-180*.
- Gamarra, A. y Aguilar, Z. (2009). Nuevas fuentes sismogénicas para la evaluación del peligro sísmico y generación de espectros de peligro uniforme en el Perú. Tesis para optar el Título de Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Ingeniería.
- Huerta, B., Ordaz, M. G., y 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*.

- Kramer, S. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. New Jersey: Prentice Hall International Series, 1ra edición.
- Lovon, H. (2017). Estimación de la vulnerabilidad sísmica de viviendas de albañilería confinada de lima. Tesis para optar el Título de Ingeniero Civil, Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Lovon, H., Tarque, N., Silva, V., y Yopez, C. (2018). Development of fragility curves for confined masonry buildings in lima, peru. *Earthquake Spectra*.
- Marulanda, M., Carreño, O., Cardona, O., Ordaz, A., y Barbat, A. (2013). Probabilistic earthquake risk assessment using capra: Application to the city of barcelona, spain. *Nat Hazards*, DOI:10.1007/s11069-013-0685-z.
- Meli, R., Bitrán, D., y Santa-Cruz, S. (2005). El impacto de los desastres naturales en el desarrollo: Documento metodológico básico para estudios nacionales de caso. *Comisión Económica para América Latina y el Caribe*.
- Mesta, C. A. (2017). Estimación de pérdidas en el stock de materiales de las edificaciones después de un terremoto. caso de estudio: ciudad de chichlayo, peru. Tesis de máster, Pontificia Universidad Católica del Perú.
- 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 displacementbased 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.
- Muñoz, A. (2013). Guía para el curso de ingeniería sismorresistente.(pucp).
- Olarte, J., Julca, J., y Orbegoso, E. (2006). Evaluación del riesgo sísmico del centro histórico de chichlayo.
- Ordaz, M., Aguilar, A., y Arboleda, J. (2007). Crisis2007 ver 7.4. *México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México*.
- Ordaz, M., Miranda, E., Reinoso, E., y Pérez-Rocha, L. E. (2000). Seismic loss estimation model for mexico city. *Auckland, 12th World Conference on Earthquake Engineering*.
- Palomino, J. S. y Tamayo, R. E. (2016). Evaluación probabilista del riesgo sísmico de hospitales en lima con plataforma capra. Tesis para optar el Título de Ingeniero Civil, Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Quispe, N. L. (2004). Evaluación de riesgo sísmico en la ciudad de ayacucho. Tesis de máster, Universidad Nacional de Ingeniería.
- Rosseto, T. y Elnashai, A. (2003). Derivation of vulnerability functions for europeantype rc structures based on observational data. *Engineering structures*, 2510, pp. 1241-1263.
- Rosseto, T. y 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.








- Sadigh, k., Chang, C., Egan, J., Madkisi, F., y Youngs, R. (1997). Attenuation relationships for shallow crustal earthquakes based on california strong motion data. *Seismological Research Letters*, 681, pp. 180-189.
- Salgado, M., Zuloaga, D., Bernal, G., Mora, M., y Cardona, O. (2014). Fully probabilistic seismic risk assessment considering local site effects for the portfolio of buildings in medellín, colombia, bull. *Bull Earthquake Eng.*, 12, pp. 671-695, DOI 10.1007/s10518-013-9550-4.
- Salgado, M., Zuloaga, D., y Cardona, O. (2013). Probabilistic seismic risk assessment of bogota and manizales with and without the influence of caldas tear fault. *Revista de Ingeniería* 38,pp. 613, Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia.
- Santa-Cruz, S. y Zeballos, A. (2009). Reporte final. country-specific risk evaluations, iadb contract no 00009-08. *PUCP*.
- Santa-Cruz, S. C. (2013). Evaluación probabilista del riesgo sísmico de locales escolares en la ciudad de lima. *PUCP*.
- Sarachaga, M. . (1997). *Conceptos básicos de sismología para ingenieros*. Centro Peruano Japonés de investigaciones sísmicas y mitigación de desastres., 1ra edición.
- Tarque, N. (2008). Seismic risk assessment of adobe dwellings. Tesis de máster, European School for Advanced Studies in Reduction of Seismic Risk (ROSE School), University of Pavia, Italy.
- Velásquez, J. y Blondet, M. (2005). Estimación de pérdidas sísmicas mediante curvas de fragilidad analíticas. *PUCP*.
- Yamin, L., Guesquiere, F., Cardona, O., y Ordaz, M. (2013). *Modelación Probabilista para la gestión del riesgo de desastre. El caso de Bogota, Colombia*. Banco Mundial, Universidad de los Andes, 1ra edición.
- Youngs, R., Chiou, S., Siva, W., y Humphrey, J. (1997). Strong ground motions attenuation relationships for subduction zone earthquakes. *Seismological Research Letters*, 681, pp. 58-73.
- Zeballos, A. (2005). Nuevas tendencias en la evaluación estructural de edificios. *CV CNIS, México, D. F.*








Anexos








Anexo A









Parámetros de Amenaza Sísmica





Tabla A.1: Coordenadas y esquema de ubicación de fuentes

Fuente	Longitud	Latitud	Profundidad (km)	Tipo Fuente	Esquema
fuente 1	-71.41	-19.345	30	Subducción interplaca	
	-71.411	-22.049	30		
	-69.498	-22.049	75		
	-69.497	-18.743	75		
	-70.983	-17.299	75		
	-72.171	-18.202	30		
fuente 2	-72.171	-18.202	30	Subducción interplaca	
	-70.983	-17.299	75		
	-74.502	-15.081	75		
	-75.236	-16.088	30		
fuente 3	-76.609	-14.878	30	Subducción interplaca	
	-75.236	-16.088	30		
	-74.502	-15.081	75		
	-75.779	-13.943	75		
	-76.334	-12.818	75		
	-77.526	-13.767	30		
fuente 4	-77.526	-13.767	30	Subducción interplaca	
	-76.334	-12.818	60		
	-77.915	-10.509	60		
	-79.214	-11.167	30		
fuente 5	-79.214	-11.167	30	Subducción interplaca	
	-77.915	-10.509	60		
	-79.509	-7.226	60		
	-81.085	-8.035	30		
fuente 6	-81.736	-6.249	30	Subducción interplaca	
	-81.085	-8.035	30		
	-79.509	-7.226	60		
	-79.961	-5.274	60		
	-81.844	-5.343	30		
fuente 7	-81.844	-5.343	30	Subducción interplaca	

Fuente	Longitud	Latitud	Profundidad (km)	Tipo Fuente	Esquema
	-79.961	-5.274	60		
	-79.618	-2.098	60		
	-81.671	-2.121	30		
fuente 8	-81.442	-1.142	25	Subducción interplaca	
	-81.671	-2.121	25		
	-79.618	-2.098	60		
	-79.573	-0.806	60		
	-78.325	2.111	60		
	-79.873	2.111	25		
fuente 9	-79.341	-0.829	30	Cortical	
	-79.258	-1.884	30		
	-77.334	-1.884	30		
	-77.317	-0.646	30		
	-76.257	2.111	30		
	-77.752	2.111	30		
fuente 10	-78.935	-4.101	30	Cortical	
	-78.554	-4.085	30		
	-77.001	-4.032	30		
	-77.072	-1.884	30		
	-77.334	-1.884	30		
	-79.258	-1.884	30		
fuente 11	-79.095	-4.867	30	Cortical	
	-79.145	-6.625	30		
	-78.038	-6.605	30		
	-77.982	-5.058	30		
	-77.628	-4.693	30		
	-77.001	-4.032	30		
fuente 12	-77.982	-5.058	30	Cortical	
	-77.278	-6.96	30		
	-75.476	-6.889	30		
	-75.479	-5.407	30		
	-76.383	-4.693	30		
	-77.628	-4.693	30		
fuente 13	-77.787	-10.26	30	Cortical	
	-76.41	-9.571	30		
	-77.207	-7.813	30		
	-77.805	-6.499	30		
	-78.038	-6.605	30		
	-79.327	-7.181	30		
fuente 14	-77.207	-7.813	30	Cortical	
	-76.41	-9.571	30		
	-76.346	-9.655	30		
	-74.627	-9.275	30		
	-75.476	-6.889	30		

Fuente	Longitud	Latitud	Profundidad (km)	Tipo Fuente	Esquema
	-77.278	-6.96	30		
fuente 15	-76.549	-12.512	30	Cortical	
	-75.205	-12.049	30		
	-76.346	-9.655	30		
	-77.915	-10.509	30		
fuente 16	-75.205	-12.049	30	Cortical	
	-75.126	-12.226	30		
	-72.954	-11.734	30		
	-72.841	-11.707	30		
	-73.562	-10.009	30		
	-74.482	-9.247	30		
	-74.627	-9.275	30		
fuente 17	-75.779	-13.943	30	Cortical	
	-74.812	-14.802	30		
	-73.733	-13.741	30		
	-72.954	-11.734	30		
	-75.126	-12.226	30		
	-75.205	-12.049	30		
fuente 18	-74.502	-15.081	30	Cortical	
	-70.983	-17.299	30		
	-69.904	-18.347	30		
	-69.497	-18.036	30		
	-69.354	-17.937	30		
	-70.352	-15.541	30		
	-70.575	-15.422	30		
	-73.194	-14.027	30		
	-73.733	-13.741	30		
-74.812	-14.802	30			
fuente 19	-70.575	-15.422	30	Cortical	
	-69.801	-12.399	30		
	-72.582	-11.26	30		
	-73.194	-14.027	30		
fuente 20	-70.436	-22.128	85	Intraplaca	
	-67.88	-22.128	200		
	-67.951	-20.193	200		
	-69.114	-16.825	200		
	-70.771	-18.23	85		
fuente 21	-70.771	-18.23	85	Intraplaca	
	-69.114	-16.825	200		
	-69.31	-15.051	200		
	-71.342	-13.296	200		
	-71.926	-13.951	200		
	-73.879	-16.142	85		

Fuente	Longitud	Latitud	Profundidad (km)	Tipo Fuente	Esquema
fuente 22	-73.879	-16.142	85	Intraplaca	
	-71.926	-13.951	120		
	-74.423	-11.798	120		
	-74.502	-11.872	120		
	-76.46	-13.924	80		
fuente 23	-71.926	-13.951	120	Intraplaca	
	-71.342	-13.296	150		
	-71.009	-12.98	150		
	-72.064	-10.979	150		
	-72.876	-11.261	150		
	-74.423	-11.798	120		
fuente 24	-76.46	-13.924	90	Intraplaca	
	-74.502	-11.872	120		
	-75.688	-10.259	120		
	-76.295	-9.127	120		
	-78.118	-10.165	120		
	-78.75	-10.525	80		
fuente 25	-75.688	-10.259	120	Intraplaca	
	-74.502	-11.872	120		
	-72.876	-11.261	140		
	-73.243	-10.157	140		
	-74.548	-9.38	140		
	-75.482	-8.455	140		
	-75.666	-8.275	140		
	-76.674	-8.355	120		
fuente 26	-78.75	-10.525	80	Intraplaca	
	-78.118	-10.165	100		
	-79.147	-8.121	100		
	-79.794	-8.578	80		
fuente 27	-79.147	-8.121	100	Intraplaca	
	-78.118	-10.165	100		
	-76.295	-9.127	120		
	-76.674	-8.355	120		
	-77.827	-6.009	120		
	-79.613	-6.977	100		
fuente 28	-74.548	-9.38	150	Intraplaca	
	-73.299	-8.35	180		
	-74.486	-6.677	180		
	-75.68	-7.275	180		
	-75.482	-8.455	150		
fuente 29	-77.827	-6.009	120	Intraplaca	
	-76.674	-8.355	120		
	-75.666	-8.275	150		
	-75.482	-8.455	150		
	-75.68	-7.275	150		

Fuente	Longitud	Latitud	Profundidad (km)	Tipo Fuente	Esquema
	-74.486	-6.677	150		
	-76.091	-3.168	150		
	-78.538	-4.004	120		
	-79.747	-7.047	80		
	-79.613	-6.977	100		
	-77.827	-6.009	120		
fuelle 30	-78.538	-4.004	120	Intraplaca	
	-80.081	-2.332	120		
	-80.375	-2.741	120		
	-81.496	-4.303	80		
	-78.538	-4.004	120		
	-76.091	-3.168	150		
	-76.531	-1.928	150		
fuelle 31	-77.011	-2.034	150	Intraplaca	
	-77.941	-2.242	150		
	-78.67	-1.212	150		
	-80.081	-2.332	120		
	-77.941	-2.242	150		
	-77.011	-2.034	150		
fuelle 32	-77.157	-0.734	150	Intraplaca	
	-78.67	-1.212	150		
	-80.375	-2.741	80		
	-80.081	-2.332	120		
	-78.67	-1.212	120		
fuelle 33	-78.509	-0.823	120	Intraplaca	
	-80.077	-0.286	120		
	-81.089	-1.48	80		

Fuente: Adaptado de (IGP, 2014)

Tabla A.2: Valor de parámetros de sismicidad por fuente

Fuente	λ_0	β	M_0	$E[M_u]$	M_1	M_2
fuelle 1	2.03	1.84	5.2	8.8	8.6	9
fuelle 2	11.54	1.66	4.3	8.2	8	8.4
fuelle 3	12.83	1.78	4.3	8	7.8	8.2
fuelle 4	4.24	1.69	4.3	8.6	8.4	8.8
fuelle 5	9.08	1.6	4.3	7.7	7.5	7.9
fuelle 6	4.48	2.07	4.3	7	6.8	7.2
fuelle 7	9.16	2.35	4.3	7	6.8	7.2
fuelle 8	4.2	1.48	4.3	8	7.8	8.2
fuelle 9	1.08	1.7	4.8	6.8	6.6	7
fuelle 10	0.78	2.49	5.2	6.8	6.6	7
fuelle 11	1.72	2.86	4.3	5.8	5.6	6
fuelle 12	1.74	2.81	5.2	6.5	6.3	6.7
fuelle 13	0.84	1.94	4.3	7.2	7	7.4

Fuente	λ_0	β	M_0	$\mathbf{E}[M_u]$	M_1	M_2
fuelle 14	0.76	2.35	4.8	5.5	5.3	5.7
fuelle 15	0.36	4.74	4.4	5.5	5.3	5.7
fuelle 16	1.6	2.74	5.2	5.5	5.3	5.7
fuelle 17	0.44	4.01	5.2	5.5	5.3	5.7
fuelle 18	1.48	2.83	4.8	5.5	5.3	5.7
fuelle 19	0.3	2.29	5	6	5.8	6.2
fuelle 20	22.14	1.88	4.4	7	6.8	7.2
fuelle 21	4.32	2.6	5.2	6.8	6.6	7
fuelle 22	2.02	2	5.1	6	5.8	6.2
fuelle 23	0.18	0.95	4.6	6	5.8	6.2
fuelle 24	1.06	2.37	5.2	6.8	6.6	7
fuelle 25	1.38	2.79	5	6	5.8	6.2
fuelle 26	0.74	3.38	5.3	6	5.8	6.2
fuelle 27	0.86	2.06	4.3	6	5.8	6.2
fuelle 28	3	2.67	5.1	7	6.8	7.2
fuelle 29	6.78	1.69	4.3	7.2	7	7.4
fuelle 30	1.32	3.41	5.1	7.5	7.3	7.7
fuelle 31	1.14	2.62	5.3	7	6.8	7.2
fuelle 32	0.96	2.25	4.3	6	5.8	6.2
fuelle 33	1.6	1.94	4.8	6	5.8	6.2

Fuente: Adaptado de (IGP, 2014)

Anexo B

Mapas de riesgo

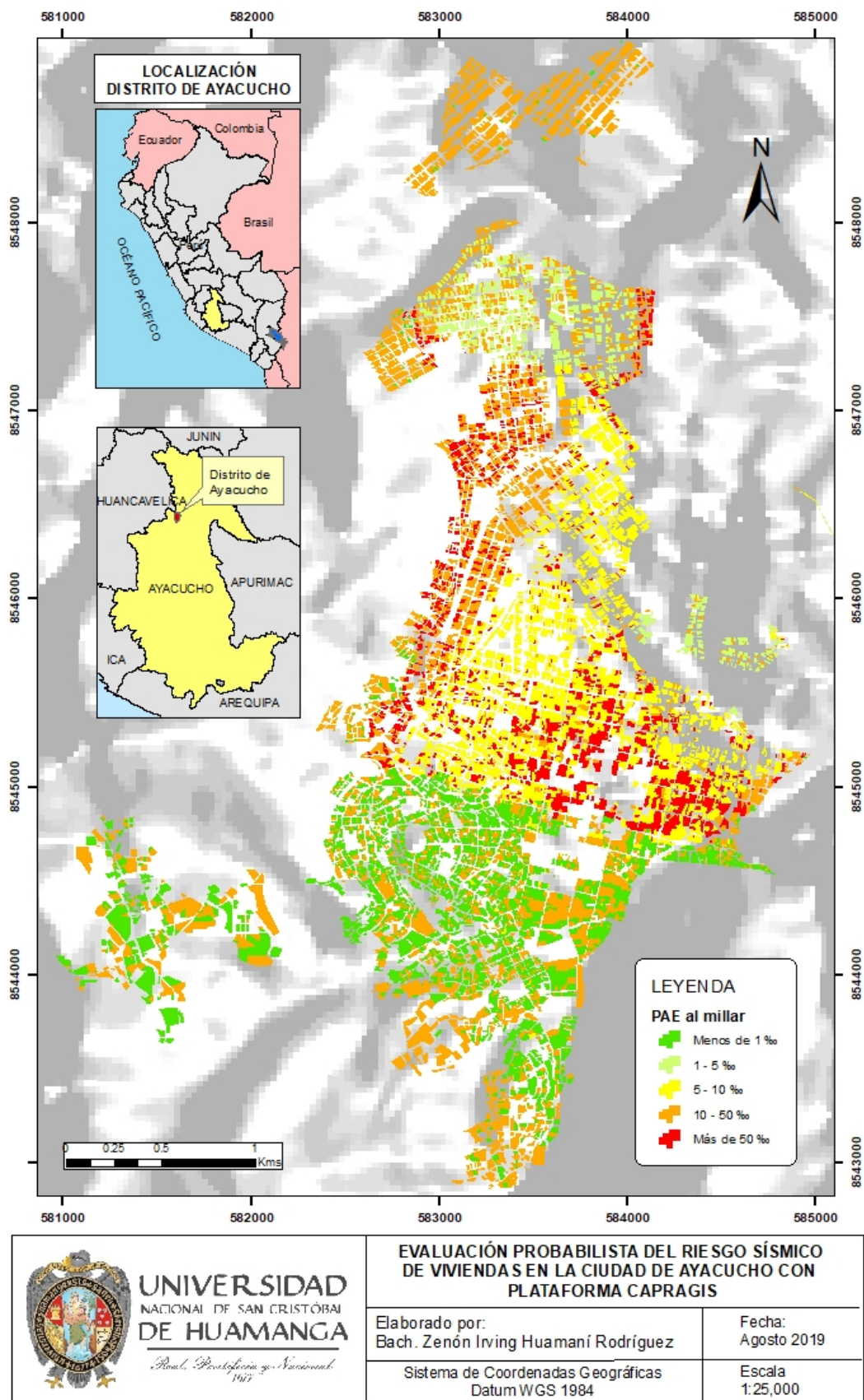


Figura B.1: Mapa del Riesgo Sísmico de la Cartera Viviendas

Fuente: Propia

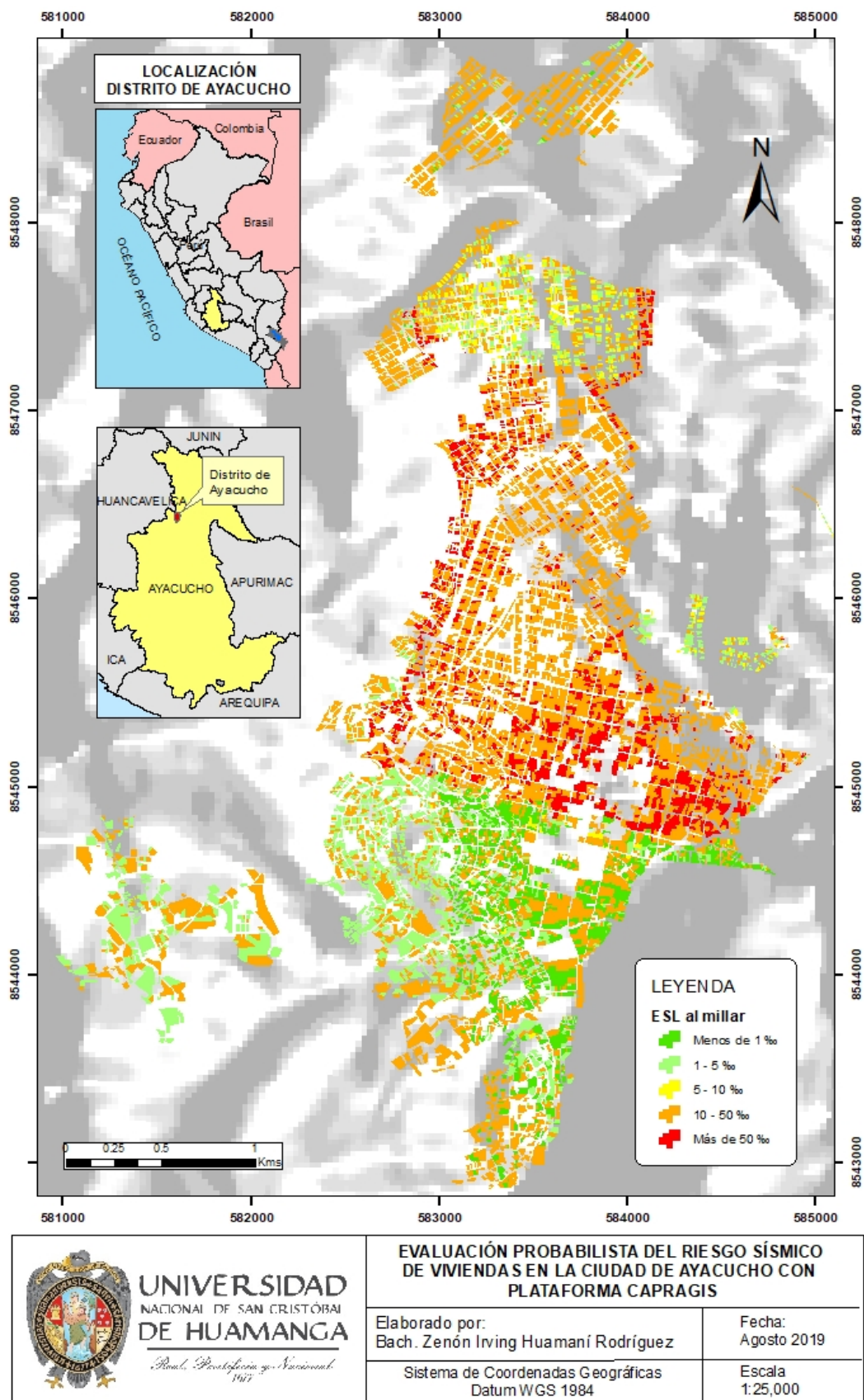


Figura B.2: Mapa del Riesgo Sísmico para un escenario de Magnitud 5.5

Fuente: Propia