



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

La Universidad Católica de Loja

ÁREA TÉCNICA

TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

**Estudio preliminar del riesgo sísmico de las edificaciones en la zona urbana
3 de la ciudad de Loja**

TRABAJO DE TITULACIÓN

AUTOR: Núñez Abarca, Rubén Darío

DIRECTOR: Duque Yaguache, Edwin Patricio, Mgtr

LOJA - ECUADOR

2016



Esta versión digital, ha sido acreditada bajo la licencia Creative Commons 4.0, CC BY-NY-SA: Reconocimiento-No comercial-Compartir igual; la cual permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, mientras se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se permiten obras derivadas, siempre que mantenga la misma licencia al ser divulgada. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>

Septiembre, 2016

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Máster.

Edwin Patricio Duque Yaguache.

DOCENTE DE LA TITULACIÓN

De mi consideración:

El presente trabajo de titulación: **“Estudio preliminar del riesgo sísmico de las edificaciones en la zona urbana 3 de la ciudad de Loja”** realizado por **Rubén Darío Núñez Abarca**, ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo.

Loja, mayo de 2016

f).....

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

“Yo **Rubén Darío Núñez Abarca** declaro ser autor del presente trabajo de titulación: Estudio preliminar del riesgo sísmico de las edificaciones en la zona urbana 3 de la ciudad de Loja, de la Titulación de Ingeniería Civil, siendo Edwin Patricio Duque Yaguache director del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales. Además certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Adicionalmente declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 88 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente textualmente dice: “Forman parte del Patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado o trabajos de titulación que se realicen con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”

f).....

Autor: Rubén Darío Núñez Abarca

Cédula: 1104721822

DEDICATORIA

A mis padres Manuel de Jesús y Angelita

A mis hermanos Édison Manuel, Richard Mesías y Ángel Mauricio

A toda mi familia y amigos

- Rubén Darío

AGRADECIMIENTO

A Dios, por darme la energía y fortaleza para alcanzar mis objetivos, iluminarme en cada paso que doy y permitirme concluir una de las etapas más importantes de mi vida.

A mis padres, por ser ejemplo de sacrificio y perseverancia, por su amor y apoyo incondicional, han sido mi fuente de inspiración y fuerzas para lograr cada meta propuesta; a mis hermanos, por su ayuda y preocupación constante; a mis familiares y amigos cercanos, por sus palabras de estímulo y sus consejos.

A los docentes de la Universidad Técnica Particular de Loja, por haber compartido sus conocimientos y experiencias durante mi formación como profesional.

A mis compañeros de investigación Paúl y Enrique por el apoyo brindado en el desarrollo de este trabajo, así como también a las personas que ayudaron en el levantamiento de información de campo.

Al Mgtr. Edwin Duque, Director de Tesis, por la apropiada guía y dirección de esta investigación, por su aporte en la elaboración de este documento y su tiempo dedicado en la revisión del mismo. A la Ing. Adriana Ayala, Exdirectora, por sus conocimientos y por haber confiado en mi persona para la realización de este trabajo.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

| | |
|--|------|
| CARÁTULA | I |
| APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN..... | II |
| DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS..... | III |
| DEDICATORIA | IV |
| AGRADECIMIENTO | V |
| ÍNDICE DE CONTENIDOS..... | VI |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | X |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | XIII |
| RESUMEN..... | 1 |
| ABSTRACT | 2 |
| INTRODUCCIÓN..... | 3 |
| CAPÍTULO I. GENERALIDADES..... | 5 |
| 1.1. Justificación..... | 6 |
| 1.2. Alcance | 6 |
| 1.3. Objetivo general | 7 |
| 1.4. Objetivos específicos..... | 7 |
| CAPÍTULO II. ESTADO DEL ARTE..... | 8 |
| 2.1. Introducción..... | 9 |
| 2.2. Sismo | 9 |
| 2.3. Sismicidad en el Ecuador | 10 |
| 2.4. Riesgo sísmico..... | 11 |
| 2.4.1. Peligrosidad sísmica. | 11 |
| 2.4.2. Vulnerabilidad sísmica. | 11 |
| 2.5. GEM (Global Earthquake Model)..... | 11 |
| 2.6. Taxonomía | 12 |
| 2.7. Simulación de Monte Carlo..... | 14 |
| 2.8. Ingeniería sísmica basada en desempeño | 14 |

| | |
|---|----|
| 2.9. Análisis estructural | 15 |
| 2.9.1. Análisis estático lineal. | 15 |
| 2.9.2. Análisis dinámico lineal. | 15 |
| 2.9.3. Análisis estático no lineal. | 16 |
| 2.9.4. Análisis dinámico no lineal. | 16 |
| 2.10. Opensees (Open System for Earthquake Engineering Simulation)..... | 16 |
| 2.10.1. Modelos basados en fibras. | 17 |
| 2.11. Capacidad estructural..... | 18 |
| 2.11.1. Análisis estático no lineal “pushover”. | 18 |
| 2.11.2. Espectro de capacidad..... | 20 |
| 2.11.3. Representación bilineal del espectro de capacidad..... | 20 |
| 2.12. Demanda sísmica..... | 21 |
| 2.12.1. Sismo de diseño. | 22 |
| 2.12.2. Espectro de respuesta para diseño..... | 22 |
| 2.13. Punto de desempeño | 24 |
| 2.13.1. Método N2. | 24 |
| 2.14. Daño sísmico..... | 25 |
| 2.15. Estados límites de daño | 25 |
| 2.16. Evaluación de la vulnerabilidad | 26 |
| 2.16.1. Curvas de vulnerabilidad..... | 27 |
| 2.16.2. Metodologías para evaluar la vulnerabilidad | 28 |
| 2.17. Efectos de sitio | 29 |
| 2.18. Mapa de riesgo sísmico..... | 29 |
| CAPÍTULO III. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA..... | 30 |
| 3.1. Introducción..... | 31 |
| 3.2. División de la zona urbana de la ciudad de Loja..... | 31 |
| 3.3. Recopilación de información estructural en la zona de estudio..... | 33 |
| 3.4. Categorización de las edificaciones..... | 39 |
| 3.4.1. Categoría 1 | 40 |

| | |
|--|----|
| 3.4.2. Categoría 2 | 41 |
| 3.4.3. Categoría 3 | 42 |
| 3.4.4. Categoría 4 | 43 |
| 3.5. Modelación estructural | 44 |
| 3.5.1. Generación de elementos estructurales..... | 44 |
| 3.5.2. Número de modelaciones | 46 |
| 3.5.3. Código en matlab con extensión a Opensees..... | 46 |
| 3.6. Espectros de demanda sísmica..... | 48 |
| 3.7. Punto de desempeño | 49 |
| 3.8. Curvas de vulnerabilidad | 49 |
| 3.9. Mapas de riesgo sísmico..... | 51 |
| CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS..... | 52 |
| 4.1. Introducción..... | 53 |
| 4.2. Espectros de capacidad bilineal | 53 |
| 4.3. Espectros de demanda..... | 59 |
| 4.4. Puntos de desempeño..... | 63 |
| 4.5. Curvas de vulnerabilidad | 66 |
| 4.6. Mapas de riesgo sísmico..... | 71 |
| 4.6.1. Mapas de riesgo sísmico por categorías..... | 71 |
| 4.6.2. Mapas de riesgo sísmico generales..... | 74 |
| CONCLUSIONES | 78 |
| FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN..... | 80 |
| ANEXOS..... | 83 |
| ANEXO A. Global Earthquake Model – Direct Observation Tools, software para el levantamiento de información estructural según la taxonomía del GEM..... | 84 |
| ANEXO B. Información estadística obtenida a partir de la base de datos de información estructural de acuerdo al GEM..... | 87 |
| ANEXO C. Memoria fotográfica de edificaciones por cada tipología estructural..... | 91 |
| ANEXO D. Mapas de riesgo sísmico – Categoría 1..... | 95 |
| ANEXO E. Mapas de riesgo sísmico – Categoría 2..... | 99 |

| | |
|--|-----|
| ANEXO F. Mapas de riesgo sísmico – Categoría 3..... | 103 |
| ANEXO G. Mapas de riesgo sísmico – Categoría 4. | 107 |
| ANEXO H. Mapas de riesgo sísmico generales. | 111 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Elementos constitutivos de un sismo..... | 9 |
| Figura 2. Esquema del encuentro de la placa de Nazca (oceánica) con la Sudamericana (continental)..... | 10 |
| Figura 3. Reporte de la taxonomía de un edificio de acuerdo al GEM..... | 13 |
| Figura 4. Elemento basado en fibras con formulación a base de desplazamiento..... | 17 |
| Figura 5. Técnica del análisis “pushover” | 19 |
| Figura 6. Curva de capacidad | 19 |
| Figura 7. Espectro de capacidad..... | 20 |
| Figura 8. Representación bilineal del espectro de capacidad..... | 21 |
| Figura 9. Espectro elástico de respuesta en formato AD (Sa vs Sd) | 22 |
| Figura 10. Espectro sísmico elástico de aceleraciones que representa el sismo de diseño | 23 |
| Figura 11. Punto de desempeño mediante el método N2..... | 24 |
| Figura 12. Representación de los estados de daño | 26 |
| Figura 13. Curvas de vulnerabilidad para tres estados de daño..... | 27 |
| Figura 14. Efectos de sitio..... | 29 |
| Figura 15. Zonas de estudio del área urbana de la ciudad de Loja. | 31 |
| Figura 16. Zona urbana 3 de la ciudad de Loja | 32 |
| Figura 17. Ventana principal del IDCT para aplicación móvil..... | 33 |
| Figura 18. Histograma de edificaciones de HA en función del número de pisos..... | 34 |
| Figura 19. Tipología de ocupación en estructuras de HA | 35 |
| Figura 20. Forma del sistema de techo en estructuras de HA | 35 |
| Figura 21. Tecnología del hormigón del marco de las estructuras de HA..... | 36 |
| Figura 22. Material de la cubierta de techo en estructuras de HA | 36 |
| Figura 23. Material de relleno de los marcos de las estructuras de HA | 37 |
| Figura 24. Irregularidad estructural en planta observada en estructuras de HA | 37 |
| Figura 25. Irregularidad estructural en elevación observada en estructuras de HA..... | 38 |
| Figura 26. Año de construcción aproximado de las estructuras de HA..... | 38 |
| Figura 27. Modelo de pórtico plano equivalente – Categoría 1 | 40 |
| Figura 28. Gráficas de las funciones de distribución de probabilidad – Categoría 1 | 40 |
| Figura 29. Modelo de pórtico plano equivalente– Categoría 2 | 41 |
| Figura 30. Gráficas de las funciones de distribución de probabilidad – Categoría 2 | 41 |
| Figura 31. Modelo de pórtico plano equivalente– Categoría 3 | 42 |
| Figura 32. Gráficas de las funciones de distribución de probabilidad – Categoría 3 | 42 |
| Figura 33. Modelo de pórtico plano equivalente– Categoría 4 | 43 |
| Figura 34. Gráficas de las funciones de distribución de probabilidad – Categoría 4 | 43 |

| | |
|--|----|
| Figura 35. Diagrama esfuerzo-deformación Concrete04 | 44 |
| Figura 36. Diagrama esfuerzo-deformación Concrete01 | 45 |
| Figura 37. Diagrama esfuerzo-deformación Steel01 | 45 |
| Figura 38. Flujograma del código en matlab con extensión a Opensees..... | 47 |
| Figura 39. Flujograma de la metodología para la obtención de curvas de vulnerabilidad | 50 |
| Figura 40. Ejemplo de lectura de probabilidades de daño..... | 51 |
| Figura 41. Espectros de capacidad bilineal promedio de las tipologías analizadas | 53 |
| Figura 42. Espectros de capacidad bilineal correspondientes a 432 edificaciones - Categoría 1 | 55 |
| Figura 43. Espectro de capacidad bilineal promedio y desplazamientos a partir de los cuáles se inicia cada estado de daño - Categoría 1 | 55 |
| Figura 44. Espectros de capacidad bilineal correspondientes a 504 edificaciones – Categoría 2 | 56 |
| Figura 45. Espectro de capacidad bilineal promedio y desplazamientos a partir de los cuáles se inicia cada estado de daño - Categoría2 | 56 |
| Figura 46. Espectros de capacidad bilineal correspondientes a 385 edificaciones – Categoría 3 | 57 |
| Figura 47. Espectro de capacidad promedio y desplazamientos a partir de los cuáles se inicia cada estado de daño – Categoría 3 | 57 |
| Figura 48. Espectros de capacidad bilineal correspondientes a 198 edificaciones – Categoría 4 | 58 |
| Figura 49. Espectro de capacidad promedio y desplazamientos a partir de los cuáles se inicia cada estado de daño - Categoría 4 | 58 |
| Figura 50. Espectros elásticos de diseño para diferentes valores de factores de zona sísmica Z | 60 |
| Figura 51. Espectros inelásticos de diseño – Categoría 1 | 61 |
| Figura 52. Espectros inelásticos de diseño – Categoría 2 | 61 |
| Figura 53. Espectros inelásticos de diseño – Categoría 3 | 62 |
| Figura 54. Espectros inelásticos de diseño – Categoría 4 | 62 |
| Figura 55. Puntos de desempeño, en función del espectro de capacidad promedio y los espectros inelásticos de diseño – Categoría 1 | 63 |
| Figura 56. Puntos de desempeño, en función del espectro de capacidad promedio y los espectros inelásticos de diseño – Categoría 2 | 64 |
| Figura 57. Puntos de desempeño, en función del espectro de capacidad promedio y los espectros inelásticos de diseño – Categoría 3 | 64 |
| Figura 58. Puntos de desempeño, en función del espectro de capacidad promedio y los espectros inelásticos de diseño – Categoría 4 | 65 |

| | |
|--|----|
| Figura 59. Curvas de vulnerabilidad para tres estados límites – Categoría 1 | 66 |
| Figura 60. Curvas de vulnerabilidad para tres estados límites – Categoría 2 | 67 |
| Figura 61. Curvas de vulnerabilidad para tres estados límites – Categoría 3 | 68 |
| Figura 62. Curvas de vulnerabilidad para tres estados límites – Categoría 4 | 69 |
| Figura 63. Probabilidad de daño estructural para los PGA representativos de la zona de estudio..... | 70 |
| Figura 64. Histograma de probabilidad de daño estructural para las tipologías estructurales establecidas..... | 71 |
| Figura 65. Histograma de probabilidad de daño estructural para la zona urbana 3 de la ciudad de Loja | 74 |
| Figura 66. Histograma de probabilidad para los sectores más representativos de la zona urbana 3 de la ciudad de Loja..... | 76 |
| Figura 67. Interfaz gráfica del software GEM – DOT | 84 |
| Figura 68. Añadir nueva observación (Materiales e irregularidad)..... | 84 |
| Figura 69. Añadir nueva observación (Componentes del Edificio)..... | 85 |
| Figura 70. Añadir nueva observación (Información del Edificio) | 85 |
| Figura 71. Añadir nueva observación (Consecuencias y Exposición)..... | 86 |
| Figura 72. Añadir nueva observación (Fotografía y Medios) | 86 |
| Figura 73. Edificación de uso residencial – Categoría 1, ejemplo # 1..... | 91 |
| Figura 74. Edificación de uso residencial – Categoría 1, ejemplo # 2..... | 91 |
| Figura 75. Edificación de uso residencial – Categoría 2, ejemplo # 1..... | 92 |
| Figura 76. Edificación de uso residencial – Categoría 2, ejemplo # 2..... | 92 |
| Figura 77. Edificación de uso residencial – Categoría 3, ejemplo # 1..... | 93 |
| Figura 78. Edificación de uso residencial – Categoría 3, ejemplo # 2..... | 93 |
| Figura 79. Edificación de uso residencial – Categoría 4, ejemplo # 1..... | 94 |
| Figura 80. Edificación de uso residencial – Categoría 4, ejemplo # 2..... | 94 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Participación de las edificaciones en función del material del sistema estructural.. | 34 |
| Tabla 2. Información estadística generada para el análisis de la categoría 1 | 40 |
| Tabla 3. Información estadística generada para el análisis de la categoría 2 | 41 |
| Tabla 4. Información estadística generada para el análisis de la categoría 3 | 42 |
| Tabla 5. Información estadística generada para el análisis de la categoría 4 | 43 |
| Tabla 6. Parámetros de la representación bilineal del espectro de capacidad promedio y ductilidad. | 54 |
| Tabla 7. Parámetros modales de las categorías | 59 |
| Tabla 8. Desplazamiento espectral y real para cada estado de daño y cada categoría | 59 |
| Tabla 9. Coeficientes utilizados para generar espectros de diseño según NEC (2015), en función de Z y el tipo de suelo. | 60 |
| Tabla 10. Puntos de desempeño para cada categoría y cada factor Z. | 65 |
| Tabla 11. Matriz de probabilidad de daño – Categoría 1 | 66 |
| Tabla 12. Matriz de probabilidad de daño – Categoría 2 | 67 |
| Tabla 13. Matriz de probabilidad de daño – Categoría 3 | 68 |
| Tabla 14. Matriz de probabilidad de daño – Categoría 4 | 69 |
| Tabla 15. Matriz de probabilidad de daño estructural por tipología. | 71 |
| Tabla 16. Matriz de probabilidad de daño estructural para los sectores más representativos de la zona urbana 3 de la ciudad de Loja – Categoría 1 | 73 |
| Tabla 17. Matriz de probabilidad de daño estructural para los sectores más representativos de la zona urbana 3 de la ciudad de Loja – Categoría 2 | 73 |
| Tabla 18. Matriz de probabilidad de daño estructural para los sectores más representativos de la zona urbana 3 de la ciudad de Loja – Categoría 3 | 73 |
| Tabla 19. Matriz de probabilidad de daño estructural para los sectores más representativos de la zona urbana 3 de la ciudad de Loja – Categoría 4 | 74 |
| Tabla 20. Matriz de probabilidad de daño estructural para la zona urbana 3 de la ciudad de Loja..... | 74 |
| Tabla 21. Matriz de probabilidad de daño estructural para los sectores más representativos de la zona urbana 3 de la ciudad de Loja..... | 75 |
| Tabla 22. Participación y número de edificaciones en función del sistema estructural..... | 87 |
| Tabla 23. Participación y número de edificaciones de HA en función del número de pisos . | 87 |
| Tabla 24. Participación y número de edificaciones de HA en función de la tipología de ocupación | 87 |
| Tabla 25. Participación y número de edificaciones de HA en función de la forma del sistema de techo..... | 87 |

| | |
|---|----|
| Tabla 26. Participación y número de edificaciones de HA en función del material de la cubierta de techo | 88 |
| Tabla 27. Participación y número de edificaciones de HA en función del material de relleno en los marcos | 88 |
| Tabla 28. Participación y número de edificaciones de HA en función de la irregularidad en planta observada o visible | 88 |
| Tabla 29. Participación y número de edificaciones de HA en función de la irregularidad vertical observada o visible | 88 |
| Tabla 30. Participación y número de edificaciones de HA en función del año de construcción | 89 |
| Tabla 31. Participación y número de edificaciones de HA en función de la tecnología de hormigón del marco | 89 |
| Tabla 32. Participación y número de edificaciones de estudio (uso residencial, comercial y mixto) en función del PGA por cada tipología estructural | 89 |
| Tabla 33. Participación (%) de las edificaciones de estudio en función del PGA para los sectores más representativos de la zona en análisis por cada tipología estructural | 90 |
| Tabla 34. Participación y número de edificaciones de estudio para cada tipología estructural | 90 |
| Tabla 35. Participación (%) de las edificaciones de estudio en función de la tipología estructural para los sectores más representativos de la zona en análisis | 90 |

RESUMEN

Se presenta un estudio preliminar del riesgo sísmico de las edificaciones en la zona urbana 3 de la ciudad de Loja ante la ocurrencia del sismo de diseño especificado en la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC, 2015), con la aplicación de la metodología DBELA (Displacement Based Earthquake Loss Assessment).

Primero se define el sector, se obtiene información estructural de las edificaciones según el Global Earthquake Model (GEM), estas se clasifican en categorías y se modelan como población aleatoria. Luego, compara para cada categoría la capacidad de desplazamiento con la demanda sísmica de desplazamiento obteniendo probabilidades de daño para cada estado límite, lo que deriva en curvas de vulnerabilidad. Finalmente, basándose en el peligro y vulnerabilidad sísmica de cada estructura georreferenciada se crean mapas de riesgo sísmico.

Se obtiene una probabilidad promedio de daño estructural igual a 59%, distribuido así: 40% de daño ligero, 11% de daño significativo y 8% de colapso. El uso adecuado de esta información puede contribuir a reducir ante el eventual sismo las pérdidas económicas, de vidas humanas y en general el impacto social.

PALABRAS CLAVE: Riesgo sísmico, DBELA, curvas de vulnerabilidad, sismo de diseño.

ABSTRACT

A preliminary study of seismic risk of buildings in the urban area 3 of Loja city for the occurrence of design earthquake specified in the Ecuadorian Standard for Construction (NEC, 2015) is presented, with the implementation of DBELA (Displacement Based Earthquake Loss Assessment) methodology.

Defines first sector, is obtained structural information of the buildings according to the Global Earthquake Model (GEM), these are classified into categories and are modeled as a random population. Then, compared for each category the displacement capacity with seismic displacement demand obtaining probabilities of damage for each limit state, which results in vulnerability curves. Finally, based on the hazard and seismic vulnerability of each structure are created georeferenced maps of seismic risk.

Is obtained for the aforementioned area an average probability of structural damage equal to 59%, distributed as follows: 40% for light damage, 11% for significant damage and 8% de collapse. Proper use of this information can help to reduce for eventual earthquake: losses economic, human lives and overall social impact.

KEYWORDS: Seismic risk, DBELA, seismic vulnerability, seismic hazard.

INTRODUCCIÓN

El fenómeno sísmico representa una de las manifestaciones más impactantes de la naturaleza. Las pérdidas de vidas humanas y la destrucción de las infraestructuras creadas por el hombre demuestran el potencial devastador de este fenómeno. Así pues, la investigación del comportamiento de las estructuras frente a la acción sísmica, representa un objetivo permanente de la ingeniería (Dumova, 2000).

La ciudad de Loja según la NEC (2015) se encuentra localizada en una zona de alta peligrosidad sísmica, eso sumado a la constante expansión urbana y una cultura local en la cual la construcción informal es una práctica generalizada, genera una gran incertidumbre sobre el comportamiento de la infraestructura ante un eventual sismo de elevada magnitud. En los últimos años en Ecuador no se han producido sismos fuertes como si han ocurrido a lo largo de la historia desde la existencia de registros como el ocurrido en Esmeraldas en el año de 1906 con una magnitud de 8.8 en la escala de Richter que actualmente ocupa el séptimo lugar entre los terremotos con mayor intensidad del mundo, esto conlleva a que haya acumulación de energía sísmica y por ende la ocurrencia de sismos con alta intensidad son probables.

En la presente investigación se realiza un estudio preliminar del riesgo sísmico en la zona urbana 3 de la ciudad de Loja, permitiendo conocer en un escenario probabilista el comportamiento de las edificaciones para diferentes estados límites de daño, ante la ocurrencia del sismo de diseño especificado en la NEC (2015) para la ciudad. Se estructura en cinco capítulos en el siguiente orden: el capítulo I indica las generalidades del proyecto, el capítulo II presenta el estado del arte relacionado a la investigación, el capítulo III muestra una descripción de la metodología utilizada para el logro de los objetivos propuestos, el capítulo IV presenta el análisis de los resultados obtenidos, para cada estado de daño y categoría; también, se realiza un análisis para los sectores más representativos de la zona en estudio y finalmente se presentan las conclusiones y futuras líneas de investigación. Además se presenta un apartado de anexos en los que se muestra el software GEM-DOT utilizado para el levantamiento de la información estructural según el GEM, información estadística obtenida a partir de la base de datos de información estructural generada mediante el software antes mencionado, una memoria fotográfica de ejemplos de edificaciones por cada tipología estructural y los mapas de riesgo sísmico obtenidos para la zona de estudio.

La metodología utilizada en este trabajo comprende los siguientes pasos: se define en primer lugar el sector de análisis dentro de la zona urbana de la ciudad en función de la densidad y características estructurales de las edificaciones; luego, se obtiene información estructural de una muestra representativa de edificaciones de acuerdo a la taxonomía del GEM, mediante

la herramienta IDCT (Inventory Data Capture Tools); posteriormente, a través de un análisis estadístico se clasifica en tipologías estructurales y se obtiene la capacidad estructural de las mismas mediante la simulación de Monte Carlo, para lo cual se realiza un análisis estructural “pushover” de pórticos planos con características estructurales y propiedades de materiales aleatorias (referidas a funciones de distribución de probabilidad); a continuación se determina la demanda sísmica representada por los espectros de diseño de la NEC (2015), que al ser comparados con la capacidad estructural media de cada categoría permiten determinar puntos de desempeño; consecutivamente se elabora curvas de vulnerabilidad para cada categoría, comparando los punto de desempeño con los desplazamientos límites de los estados de daño de cada modelo simulado, obteniéndose valores de probabilidad de daño en función del grado de intensidad sísmica; y finalmente se generan mapas de riesgo sísmico georreferenciados, por medio de la representación gráfica del riesgo de cada edificación.

Esta investigación constituye un aporte teórico-práctico al conocimiento de la temática, además los resultados tienen una alta trascendencia social, ya que las entidades públicas encargadas de la gestión y planificación urbana local pueden hacer uso de la información generada con el fin de establecer programas de reforzamiento, rehabilitación y/o contingencia de edificaciones de mayor riesgo sísmico, así como para desarrollar planes de emergencia y de prevención de desastres. Adicionalmente la información es valiosa para la sociedad civil, sector de la construcción, sector inmobiliario debido a su incidencia directa en la plusvalía.

CAPÍTULO I
GENERALIDADES

1.1. Justificación.

A pesar de los avances realizados en las últimas décadas en la ingeniería sísmica y estructural, las pérdidas económicas y de vidas humanas debidas a terremotos han ido en aumento. Muchas estructuras han sido construidas sin tener en cuenta criterios de diseño antisísmico y a pesar de que hoy en día, los códigos sísmicos son más rigurosos, el crecimiento de la población en zonas sísmicas contribuye al aumento del riesgo.

Experiencias pasadas han hecho comprender la importancia del diseño, control en los procesos constructivos, fiscalización y mantenimiento de las edificaciones; especialmente en zonas de sismicidad elevada. En sitios donde la sismicidad es moderada o baja un sismo puede ocasionar daños considerables, esto se debe a que las edificaciones se construyeron sin considerar ninguna normativa sismo resistente.

En los últimos años han ocurrido sismos de gran intensidad en nuestro continente, tales como el ocurrido en Haití, el 12 de enero de 2010 con una magnitud de 7.0 en la escala de Richter; y el terremoto que se dio en Chile, el 27 de febrero de 2010, con una intensidad de 8.8 en la misma escala; dichos terremotos mostraron en cada país la vulnerabilidad de la infraestructura. En Haití un país sísmicamente no preparado los daños fueron devastadores, mientras que en Chile la vulnerabilidad estructural era menor, consecuentemente las pérdidas de vidas humanas y económicas no fueron catastróficas.

Es por esto necesario realizar estudios para evaluar el riesgo sísmico en las zonas urbanas, especialmente en aquellas en donde la peligrosidad sísmica es alta, para poder establecer acciones de mitigación.

1.2. Alcance.

Este estudio de riesgo sísmico realizado en la presente investigación considera edificaciones aporticadas de hormigón armado de uso residencial, comercial y mixto (residencial y comercial); este tipo de edificios representan aproximadamente el 85% de la muestra.

Con la información obtenida en esta investigación de riesgo sísmico se espera tratar de reducir ante la ocurrencia del sismo de diseño el número de pérdidas humanas y económicas considerando que el comportamiento sísmico inadecuado de las estructuras es la principal causa de pérdidas ante un eventual sismo.

Las curvas de vulnerabilidad generadas pueden ser utilizadas como referencia para estimar el riesgo sísmico en otras ciudades o sectores urbanos con condiciones geológicas y tipologías estructurales similares a las expuestas en esta investigación.

1.3. Objetivo general.

Generar mapas de riesgo sísmico para la zona urbana 3 de la ciudad de Loja.

1.4. Objetivos específicos.

- Crear una base de datos de información estructural de acuerdo a las especificaciones del GEM.
- Categorizar las edificaciones muestreadas en función de sus características estructurales.
- Crear curvas de vulnerabilidad para al menos tres estados de daño por cada categoría de edificios considerada.

CAPÍTULO II
ESTADO DEL ARTE

2.1. Introducción.

En el presente capítulo se presenta el estado del arte correspondiente a estudios de riesgo sísmico de edificaciones en zonas urbanas, el objetivo es relacionar el problema en estudio (riesgo sísmico de las edificaciones en la zona urbana 3 de la ciudad de Loja) con la teoría, conceptos y procedimientos relacionados a la temática.

2.2. Sismo.

Se denomina sismo o terremoto a los movimientos bruscos del terreno que se generan en la corteza terrestre como consecuencia de la liberación de energía en el interior de la tierra acumulada durante largos periodos de tiempo. Esta energía se transmite a la superficie en forma de ondas sísmicas que se propagan en todas las direcciones. El punto en que se libera la energía del sismo se llama foco o hipocentro y el punto de la superficie terrestre más próximo al foco del sismo se llama epicentro, generalmente es el sitio en la superficie terrestre donde la intensidad del terremoto es mayor.

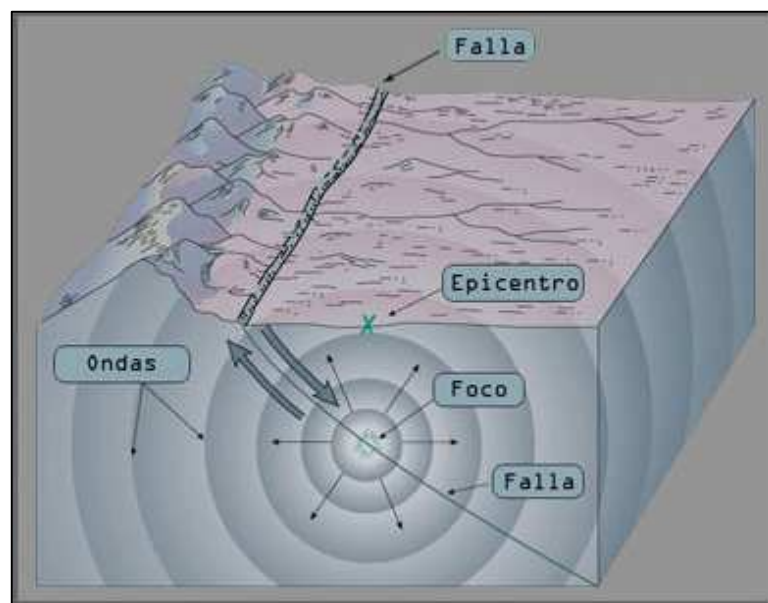


Figura 1. Elementos constitutivos de un sismo

Fuente: (Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, 2016)

Los sismos se pueden medir en función de su magnitud y de su intensidad, ambas son expresadas en grados por lo que a menudo son confundidas pero expresan propiedades diferentes. La magnitud está relacionada a la cantidad total de energía que se libera por medio de las ondas sísmicas (Sarria, 1995). La intensidad es la medida o estimación empírica de la vibración o sacudimiento del suelo, se mide teniendo en cuenta los daños causados en las edificaciones y en la naturaleza a través de como el hombre percibe las vibraciones sísmicas (kuroiwa, 2002).

2.3. Sismicidad en el Ecuador.

Ecuador forma parte del cinturón de fuego del pacífico, región que debido a su geología genera la mayor cantidad de sismos por año a nivel mundial siendo la zona en la que han ocurrido los sismos más potentes de la historia de la humanidad desde que se tiene registros. En el cinturón de fuego del pacífico y concretamente en el Ecuador, el proceso de subducción de la placa de Nazca genera una alta sismicidad en su recorrido (buzamiento) hacia el Este. Esta interacción es un proceso permanente, se ha mantenido desde hace 25 millones de años. Por este proceso en la costa ecuatoriana, tienen un hipocentro superficial y en la región oriental los eventos sísmicos asociados con la subducción pueden tener profundidades focales mayores a 200 Km. A más de la actividad sísmica asociada a la zona de subducción existen sismos que se generan por la activación de fallas geológicas locales (Aguiar, 2008).

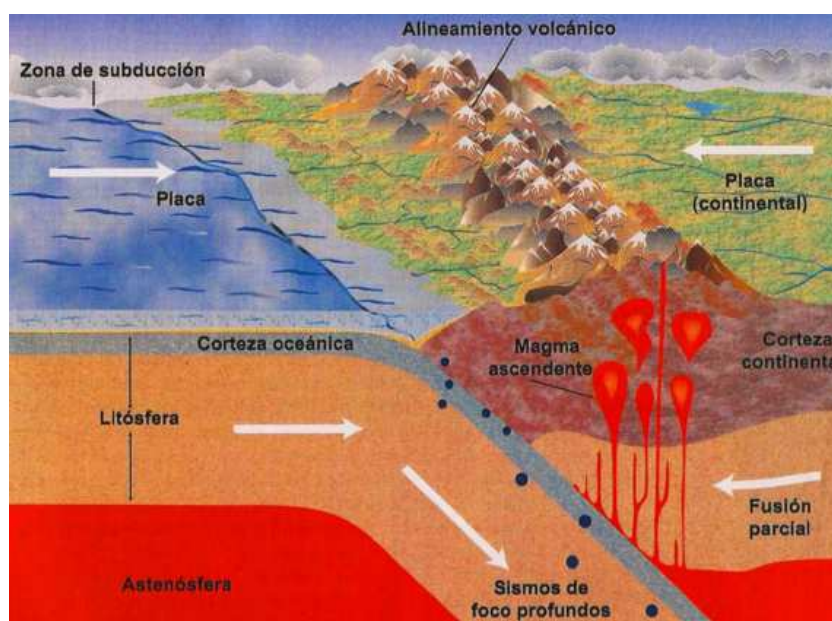


Figura 2. Esquema del encuentro de la placa de Nazca (oceánica) con la Sudamericana (continental)
Fuente: (SMIS, 2016)

Por lo general los sismos superficiales son los que causan mayor daño. Por este motivo, se puede indicar que la Costa Ecuatoriana es la de mayor peligrosidad sísmica, seguida por la Sierra y finalmente por el Oriente. Por lo tanto, desde el punto de vista sísmico no es lo mismo construir en la ciudad de Esmeraldas donde la peligrosidad sísmica es muy grande que en la ciudad de Tena que tiene una menor amenaza sísmica. En los últimos años no se han registrado sismos de elevada intensidad, por lo tanto, se deduce que a lo mejor se está acumulando energía y que probablemente en un futuro cercano se produzca un sismo muy fuerte (Aguiar, 2008).

2.4. Riesgo sísmico.

Se define como el grado de daños o pérdidas esperados en las estructuras durante el tiempo que permanecen expuestas a la acción sísmica, este lapso de tiempo se denomina periodo de exposición o periodo de vida útil de las estructuras (Barbat, 1998).

El riesgo sísmico depende tanto de la peligrosidad sísmica del sitio como de la vulnerabilidad sísmica de las estructuras. Evidentemente la peligrosidad sísmica no se puede modificar ya que es un fenómeno de la naturaleza. Sin embargo, la vulnerabilidad puede ser modificada para asegurar un nivel de riesgo sísmico adecuado para la zona o estructura en particular.

2.4.1. Peligrosidad sísmica.

Probabilidad de excedencia, dentro de un periodo específico de tiempo y dentro de una región determinada, de movimientos del terreno cuyos parámetros aceleración, velocidad, desplazamiento, magnitud o intensidad son cuantificados (NEC, 2015). Es imprescindible una buena definición de la peligrosidad sísmica para poder estimar adecuadamente el nivel de pérdidas o daños esperados en las estructuras a causa de un sismo.

2.4.2. Vulnerabilidad sísmica.

Se define como el grado de daño de uno o varios sistemas estructurales como resultado de un movimiento sísmico de determinada magnitud, expresada en una escala de cero (sin daños) a uno (daño total). Los edificios son estructuras vulnerables a los sismos, mientras se realiza un análisis del riesgo sísmico es imprescindible poder identificar la vulnerabilidad sísmica asociada a los diferentes estados de daño del sistema estructural. La vulnerabilidad en edificios existentes se relaciona con la capacidad que tienen de soportar los desplazamientos y esfuerzos inducidos por un sismo, además también está relacionada con el comportamiento de los elementos no estructurales, por ejemplo paredes, instalaciones, equipos, entre otros (Moreno, 2006).

2.5. GEM (Global Earthquake Model).

La fundación GEM es una asociación pública-privada que impulsa un esfuerzo de colaboración global en el que se aplica la ciencia para desarrollar recursos de alta calidad para la evaluación transparente del riesgo sísmico y facilitar su aplicación para la gestión del riesgo en todo el mundo (GEM, 2016). EL GEM en colaboración con investigadores ecuatorianos, el Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda y la Cámara de la Construcción generó mediante el software OpenQuake la nueva zonificación sísmica para el código de construcción nacional NEC (2011) estableciendo mapas y curvas de peligro sísmico, estos resultados están vigentes en la NEC (2015).

2.6. Taxonomía.

Según la Real Academia Española la taxonomía es la ciencia que trata de los principios, métodos y fines de la clasificación. En esta investigación se utiliza la taxonomía de un edificio propuesta por el GEM, que es vista por sus desarrolladores como la taxonomía de próxima generación capaz de capturar todos los diferentes tipos de edificios existentes y se acompaña de herramientas que permiten trabajar fácilmente. En pocas palabras es un esquema para la clasificación de edificios en todo el mundo. La información de edificios obtenida en este estudio a través de las herramientas de captura de datos de inventario, puede ser incorporada a la base de datos de exposición global del GEM para futuras investigaciones.

La taxonomía del GEM consiste en: trece atributos principales (descritos en una tabla general), diferentes características de varios tipos de edificios que se pueden elegir para cada atributo (descritos en trece tablas) y un glosario que define todos los atributos y características del edificio e ilustra con fotos e imágenes siempre que sea posible. A continuación se describen los trece atributos principales de la taxonomía propuesta por el GEM:

1. Dirección.- es la orientación del edificio con diferentes sistemas de carga-resistencia lateral en dos direcciones horizontales principales de la planta del edificio, que son perpendiculares el uno al otro.
2. Material del sistema de carga-resistencia lateral.- por ejemplo, mampostería o madera.
3. Sistema de carga-resistencia lateral.- es decir, el sistema estructural que proporciona la resistencia contra las fuerzas sísmicas horizontales a través de componentes verticales y horizontales, por ejemplo muro de corte, marco resistente a momentos, etc.
4. Altura.- es la altura del edificio sobre el suelo en función del número de plantas (por ejemplo, un edificio de 3 pisos de altura); este atributo también incluye información sobre el número de sótanos (si presenta) y la pendiente del terreno.
5. Fecha de construcción o adaptación.- es el año en que se completó la construcción o adaptación del edificio.
6. Ocupación.- el tipo de actividad (función) para la cual se utiliza el edificio.
7. Posición del edificio dentro del bloque.- es la posición dentro de un bloque de edificios (por ejemplo, un "edificio independiente" no está conectado a ningún otro edificio).
8. Forma de la planta del edificio.- por ejemplo forma de L, rectangular, etc.
9. Irregularidad estructural.- características de la disposición estructural de un edificio que son irregulares como que un piso sea significativamente más alto que otros, cambios en la forma vertical de la estructura, el cambio de sistema o materiales que se conoce producen vulnerabilidad ante un terremoto, esquinas re-entrantes, piso blando, entre otros.
10. Paredes exteriores.- material que las conforma, por ejemplo mampostería, vidrio, etc.

11. Techo.- describe la forma y el material de la cubierta del techo, el sistema estructural de soporte de la cubierta y la conexión de techo-sistema estructural.
12. Piso.- describe el material y tipo de sistema del piso y la conexión piso-sistema estructural.
13. Cimentación.- es la parte de la construcción en la cual la base del edificio transmite cargas desde el edificio hasta el suelo subyacente. Por ejemplo, una cimentación superficial soporta el peso de un edificio en condiciones de suelo duros y necesita una cimentación profunda para proveer soporte a edificios situados en suelos blandos.

GEM Building Taxonomy Report

Edificación de uso residencial

Rubén Núñez
UTPL-Ecuador
rdnunez2@utpl.edu.ec



Taxonomy string:
DX/CR-CIP /LFINF-DNO /DY /CR-CIP /LFINF-DNO /HEX-1+HBEEX-0+HFAPP-2.75+HD-0 /YEX-2001 /RES+RES1 /BPD /PLFR /IRRE /EWMA /RSH1+RMN+RC-RC2+RWCP /FN+FWCP /FOSSL

| | |
|---|---|
| Material type (DX): Concrete, reinforced | Material technology (DX): Cast-in-place concrete |
| Type of lateral load-resisting system (DX): Infilled frame | System ductility (DX): Non-ductile |
| Date of construction or retrofit: Exact date of construction or retrofit: 2001 | Number of storeys above ground: Exact number of storeys: 1 |
| Height of grade above ground level: Approximate height above grade: 2.75 | Building occupancy class - general: Residential |
| Building occupancy class - detail: Single dwelling | Building Position within a block: Detached building |
| Shape of the Building Plan: Rectangular, solid | Material of exterior walls: Masonry exterior walls |
| Type of irregularity: Regular structure | Roof shape: Flat |
| Roof system material: Concrete roof | Roof system type: Cast-in-place beam-supported RC roof |
| Roof connections: Roof-wall diaphragm connection present | Floor system material: No elevated or suspended floor material (single-storey) |
| Foundation system: Shallow foundation, with lateral capacity | Region (province, state, etc.): Loja (Ecuador) |

Figura 3. Reporte de la taxonomía de un edificio de acuerdo al GEM
Fuente: El autor

2.7. Simulación de Monte Carlo.

Permite simular el comportamiento de sistemas físicos o numéricos, se distingue de otros métodos de simulación por ser estocástico (no determinista); este comportamiento se debe generalmente al uso de secuencias de números aleatorios. Ha sido reconocido como el más preciso para todos los cálculos que requieren el conocimiento de la función de distribución de probabilidad de las repuestas de ciertos sistemas bajo ciertas excitaciones. La idea general del método consiste en que las respuestas “Y” de un sistema dependen de un grupo de variables aleatorias “X”, cuya descripción probabilística es conocida. Por medio de algoritmos adecuados, se puede generar una población grande de muestras de cada una de estas variables, de tal manera que sus histogramas de probabilidad representen el comportamiento del sistema (Bonnet, 2003). Tras repetir n veces este experimento, se dispone de n observaciones sobre el comportamiento del sistema, lo cual es de utilidad para entender el funcionamiento del mismo obviamente, el análisis será más preciso a mayor número de n experimentos que se lleven a cabo (Faulín & Juan, 2009). En esta investigación se utiliza la simulación de Monte Carlo para elaborar un modelo matemático del sistema en estudio, en este caso la generación aleatoria de una población de edificios basados en funciones de distribución de probabilidad de variables como: dimensiones de secciones de vigas y columnas, longitud de vanos, entre otras, y así lograr describir el comportamiento de una tipología estructural.

2.8. Ingeniería sísmica basada en desempeño.

El análisis o diseño basado en el comportamiento esperado o desempeño se ha convertido en una disciplina de gran importancia en la ingeniería estructural moderna especialmente en la ingeniería sísmica, sobre la cual se está basando actualmente el desarrollo de una nueva generación de normativas. Su ámbito de aplicación ha trascendido el diseño de edificios nuevos para también emplear sus conceptos y métodos en la predicción del comportamiento de edificios existentes. La ingeniería sísmica basada en desempeño involucra el diseño completo y permite que el edificio sea construido para resistir sismos de diferentes magnitudes, permitiendo ciertos límites de daño en función del tipo de sismo. Los primeros procedimientos de diseño consideraban un único objetivo, evitar el colapso estructural. En el diseño sísmico tradicional basado en fuerzas, la estructura es diseñada elásticamente para una respuesta de aceleración reducida y entonces el desplazamiento es revisado como parte del criterio de aceptabilidad. En la metodología basada en desplazamiento (desempeño), el proceso de diseño es inverso, se diseña el edificio con control de desplazamiento y entonces se revisa para las fuerzas (Moreno, 2006). La NEC (2015) menciona que el diseño basado en desplazamientos es una alternativa al basado en fuerzas, el cual es de aplicación obligatoria.

2.9. Análisis estructural.

Analizar una estructura es el proceso sistemático que concluye con el conocimiento de las características de su comportamiento bajo un cierto estado de cargas. La respuesta tanto en sus elementos estructurales como no estructurales frente a una acción o carga determina su capacidad, que está directamente relacionada con sus características geométricas y sus materiales. El objetivo del análisis de una estructura es la predicción de su comportamiento bajo las diferentes acciones para las que se establezca debe tener capacidad de respuesta. En un análisis lineal las propiedades estructurales tales como la rigidez y el amortiguamiento son constantes, es decir no varían en el tiempo. Todos los desplazamientos, esfuerzos, reacciones, son directamente proporcionales a la magnitud de las cargas aplicadas. En un análisis no lineal las propiedades estructurales pueden variar con el tiempo, la deformación y la carga, por lo tanto la respuesta suele no ser proporcional a las cargas. En el análisis no lineal no es aplicable el principio de superposición, por lo tanto sólo es posible realizar análisis estático paso a paso o de historias en el tiempo (Moreno, 2006). A continuación se muestran los métodos de análisis sísmicos.

2.9.1. Análisis estático lineal.

La estructura es simulada como un sistema equivalente de uno o varios grados de libertad con una rigidez elástica lineal y un amortiguamiento viscoso equivalente. La acción sísmica de entrada es modelada por una fuerza lateral equivalente. Basados en el primer modo de vibración del edificio (modo predominante), la fuerza lateral es distribuida en la altura del edificio y las fuerzas y desplazamientos internos son calculados usando el análisis elástico lineal (Moreno, 2006).

2.9.2. Análisis dinámico lineal.

La estructura se modela como un sistema de uno o varios grados de libertad, con una matriz de rigidez elástica lineal y una matriz de amortiguamiento viscoso equivalente. La acción de entrada es modelada usando un análisis modal o a través de un análisis de historias en el tiempo. El análisis modal supone que la respuesta dinámica de un edificio puede ser estimada a partir de la respuesta independiente de cada modo natural de vibración usando el espectro de respuesta elástico lineal. Solamente se consideran los modos que contribuyen de forma significativa a la respuesta de la estructura. La mayoría de los códigos sísmicos requieren que se incluyan suficientes modos de vibración como para movilizar un 90% de la masa efectiva. El análisis de historias en el tiempo implica una evaluación paso a paso de la respuesta del edificio, usando registros reales o acelerogramas artificiales como movimiento de entrada. En ambos casos, tanto las fuerzas como los desplazamientos internos se calculan usando un análisis lineal elástico (Moreno, 2006).

2.9.3. Análisis estático no lineal.

Se basa en el análisis estático considerando la respuesta no lineal de los materiales. Existen muchos métodos para realizar este tipo de análisis, todos ellos tienen en común que las características no lineales (fuerza-deformación) de la estructura son representadas por una curva de capacidad (pushover). El máximo desplazamiento que probablemente puede ser experimentado durante un sismo en particular, es determinado usando espectros de respuesta inelásticos. La gran ventaja de este método con respecto al análisis lineal es que directamente tiene en cuenta los efectos de la respuesta no lineal del material y por lo tanto el cálculo de las fuerzas internas y desplazamientos son más reales (Moreno, 2006).

2.9.4. Análisis dinámico no lineal.

Con este método la estructura es modelada de manera similar al análisis dinámico lineal, pero incorporando directamente la respuesta inelástica del material. La principal diferencia es que el sismo de entrada, sólo puede ser modelado usando una función de historias en el tiempo, lo que implica una evaluación paso a paso de la respuesta del edificio. Es la técnica de análisis más sofisticada disponible. Es posible incluir la participación de los componentes no estructurales y además se puede incluir la interacción suelo-estructura. Los resultados deben ser utilizados cuidadosamente debido a las posibles incertidumbres existentes en el modelo o en la representación de la acción sísmica. La respuesta es muy sensible a las características del sismo de entrada, por lo tanto, se requieren varios análisis de historias en el tiempo usando diferentes registros de acelerogramas. El principal valor de un análisis dinámico no lineal es que puede simular el comportamiento de una estructura en detalle, es decir, describe los desplazamientos esperados así como la distribución y propagación del daño, la distribución de esfuerzos y de cortante y la forma de la curva histerética (Moreno, 2006).

2.10. Opensees (Open System for Earthquake Engineering Simulation).

Opensees es un software para la simulación de la respuesta sísmica de sistemas estructurales y geotécnicos, sometidos a eventos sísmicos, posee capacidades avanzadas para la modelación y análisis de la respuesta no lineal estática o dinámica de sistemas, para ello dispone de un amplio rango de modelos de materiales, elementos y algoritmos de solución. Opensees utiliza métodos basados en elementos finitos, por lo tanto el primer paso para la modelación es subdividir el sistema en elementos y nudos, para de esta manera definir la acción de cargas y las restricciones nodales. La característica principal de Opensees es que dicha modelación y simulación se realiza a través de una fuente abierta, esto quiere decir que Opensees está bajo constante desarrollo, de modo que los diseñadores y los usuarios pueden actualizar sus bases permanentemente. Es promovido por el Pacific Earthquake Engineering Research Center a través de la Fundación Nacional de Ciencia de Los Estados Unidos.

2.10.1. Modelos basados en fibras.

Una fibra es una sección que se discretiza en secciones más pequeñas llamadas “parches”, para estas subregiones la respuesta esfuerzo-deformación de los materiales es integrada a fin de obtener un comportamiento resultante para la sección. Por ejemplo, las secciones de hormigón armado se conforman de algunas fibras internas como se muestran en la figura 3.

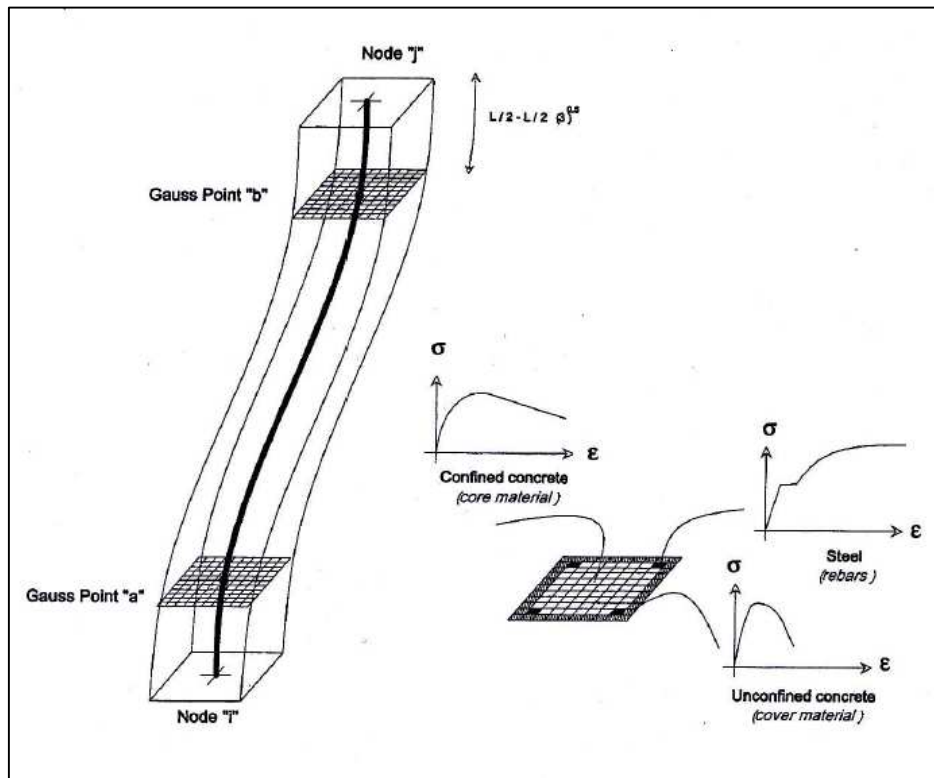


Figura 4. Elemento basado en fibras con formulación a base de desplazamiento
Fuente: (Bal, Pinho, & Crowley, 2010)

Hay dos opciones básicas de modelado para investigar el comportamiento de las estructuras de hormigón armado existentes a efectos de aplicación en la evaluación de pérdidas o daños. Una opción es el uso de modelos de inelasticidad concentrada; mientras que la otra opción requiere el uso de elementos basados en fibras, que son computacionalmente mucho más exigentes pero con la introducción de ordenadores rápidos surgen como una alternativa viable. Las limitaciones de los elementos de inelasticidad concentrada son tales que las deformaciones inelásticas toman un lugar en ubicaciones predefinidas de los miembros. Esto puede ser una suposición razonable para los pisos inferiores pero es cuestionable restringir la posible formulación de rótulas plásticas en los elementos de los pisos superiores. Otro, y en muchos aspectos más grave enfocándose en la evaluación de las estructuras existentes es el hecho de que elementos de inelasticidad concentrada requieren la calibración de los parámetros de histéresis. Esto es prácticamente inviable para la evaluación de las estructuras existentes y requiere una gran experiencia (Bal et al., 2010).

Debido a las limitaciones de los modelos inelasticidad concentradas que se explicó anteriormente modelos de elementos finitos a base de fibras se han utilizado para modelar las estructuras de hormigón armado para los propósitos de esta investigación. Hay dos razones para la selección de los modelos basados en fibra: la precisión y el acceso directo a valores de deformación seccionales. Valores de deformación son de primordial importancia para estudios de evaluación de pérdidas basados en la mecánica debido a que las definiciones de daño se basan en deformaciones que exceden (o que no exceden) ciertos niveles de estados límites predefinidos. Modelos basados en fibras permiten a los usuarios acceder a resultados de deformación sin un esfuerzo extra de post-procesamiento (Bal et al., 2010).

2.11. Capacidad estructural.

La capacidad de una estructura es función de las características geométricas y la resistencia y deformación máxima de sus componentes individuales. Para determinar la capacidad más allá del límite elástico, es necesario utilizar algún tipo de análisis no lineal como por ejemplo el análisis estático no lineal “pushover”.

2.11.1. Análisis estático no lineal “pushover”.

El análisis estático no lineal es una técnica eficiente para estudiar la capacidad resistencia-deformación de una estructura bajo una distribución esperada de fuerzas inerciales. El análisis “pushover” se efectúa aplicando un patrón de cargas laterales a la estructura que representen las fuerzas sísmicas, patrón que va incrementando monotónicamente hasta alcanzar la capacidad última de la estructura o el colapso. Utilizando este procedimiento es posible identificar la secuencia del agrietamiento, cedencia y fallo de los componentes, los estados límites de servicio y la historia de deformaciones y cortantes en la estructura. El objetivo de este procedimiento es cuantificar la capacidad de la estructura para absorber una acción lateral como en este caso la de un sismo. Durante el análisis, el cortante en la base va incrementando progresivamente manteniendo constante el patrón de fuerzas sísmicas distribuido en la altura del edificio. Para conseguir una representación realista de esfuerzos sísmicos se emplea una distribución de las fuerzas sísmicas laterales similar a las de las fuerzas sísmicas estáticas equivalentes, las cuales siguen la forma del modo fundamental de vibración o una distribución más sencilla como puede ser triangular invertida, parabólica o uniforme. La forma de distribución de las fuerzas laterales (triangular, parabólica, uniforme) aplicadas a una estructura influye en la determinación de las curvas de capacidad, no existe un patrón de fuerzas que sea universalmente aceptado. Una solución práctica es utilizar al menos dos distribuciones diferentes y definir la curva de capacidad mediante la envolvente de los resultados obtenidos (Martínez, 2012).

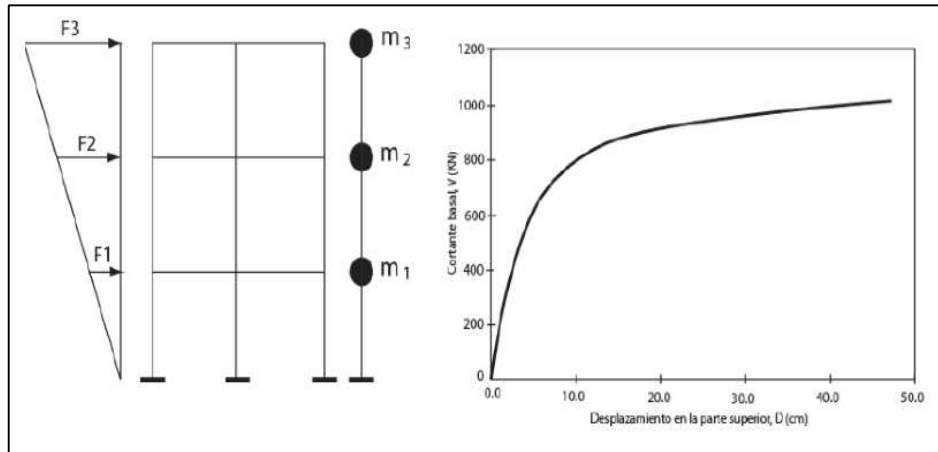


Figura 5. Técnica del análisis “pushover”
Fuente: (Bonnet, 2003)

Una curva de capacidad se define como la relación que existe entre la resistencia a la carga lateral de una estructura y su desplazamiento lateral característico. En la figura 6 se muestra una representación típica de una curva de capacidad con el cortante en la base, en el eje de las ordenadas, mientras que, en el eje de las abscisas se representa el desplazamiento lateral en el último piso del edificio. La curva de capacidad se construye generalmente para representar la respuesta del primer modo de la estructura, basado en la hipótesis según la cual el modo fundamental de vibración se corresponde con la respuesta predominante. Esto es generalmente válido para estructuras con periodos propios menores que un segundo. Para estructuras más flexibles, el análisis debe considerar la influencia de los modos más altos de vibración. Lo anterior supone que previamente a realizar un análisis pushover, deberá llevarse a cabo un análisis modal que permita definir las frecuencias y modos de vibrar. Para facilitar una comparación directa con el espectro de demanda la curva de capacidad se convierte a un espectro de capacidad mediante un cambio de variable, de forma que el cortante en la base se transforma a aceleración espectral y el desplazamiento en el último piso a desplazamiento espectral (Moreno, 2006).

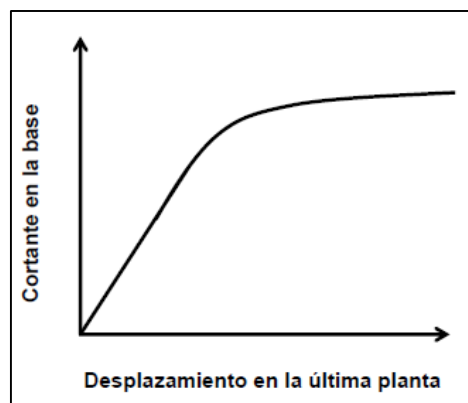


Figura 6. Curva de capacidad
Fuente: (Moreno, 2006)

2.11.2. Espectro de capacidad.

El espectro de capacidad es la representación de la curva de capacidad en un espacio de coordenadas espectrales, esta curva relaciona la aceleración espectral con el desplazamiento espectral. Para obtener el espectro de capacidad de una estructura se necesita transformar punto a punto la curva de capacidad a coordenadas espectrales. Para llevar a cabo esta transformación se necesita conocer las propiedades dinámicas de la estructura: modos de vibración y el factor de participación modal, obtenidas del análisis modal (Bonnet, 2003).

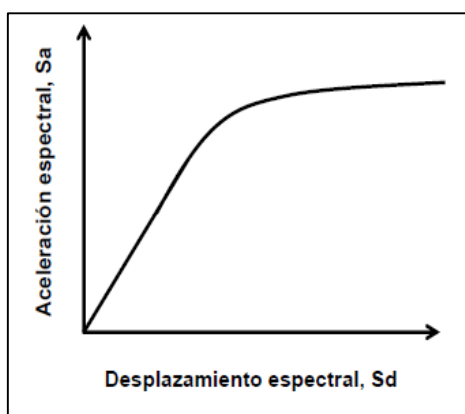


Figura 7. Espectro de capacidad
Fuente: (Moreno, 2006)

2.11.3. Representación bilineal del espectro de capacidad.

Con la finalidad de tener parámetros objetivos y cuantificables respecto al comportamiento de la estructura el espectro de capacidad se representa por medio de una curva bilineal definida por dos puntos de control: capacidad de cedencia (A) y capacidad última (B). El punto de cedencia representa el desplazamiento en el que la repuesta del edificio empieza a ser fundamentalmente no lineal. El punto de capacidad última representa el desplazamiento en el que el sistema estructural global ha alcanzado el mecanismo de colapso, los puntos de capacidad de cedencia y capacidad última son fundamentales ya que se relacionan con la ductilidad de la estructura. Una estructura tiene ductilidad cuando es capaz de responder inelásticamente a una acción sísmica prevista en su diseño sin una degradación significativa de la resistencia. En esta investigación la representación bilineal de la curva del espectro de capacidad se determinó con un criterio de balance de energía. Así, se busca una curva bilineal que pueda absorber la misma energía que la curva de capacidad real (área bajo la curva) y que tenga el mismo punto de colapso. Partiendo de la rigidez elástica (k_i), el punto de cedencia se define de forma que el área bajo la curva de capacidad y el área bajo su aproximación bilineal coincidan. En otras palabras se igualarán las áreas que comprendidas entre ambas curvas, quedan por encima y por debajo de la curva de capacidad (Moreno, 2006).

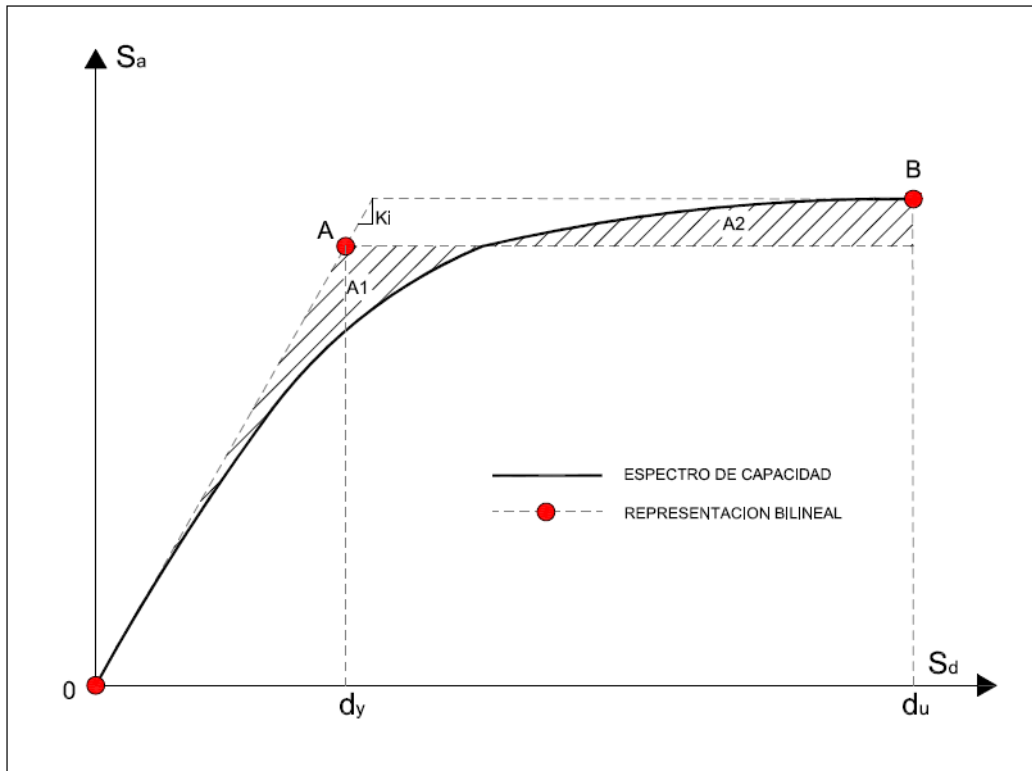


Figura 8. Representación bilineal del espectro de capacidad
Fuente: (Bonnet, 2003)

2.12. Demanda sísmica.

La demanda sísmica generalmente se representa mediante un espectro de respuesta, este representa la respuesta máxima de sistemas de un grado de libertad como una función de sus frecuencias. Tradicionalmente en la ingeniería sísmica se ha utilizado un espectro de respuesta de aceleraciones para procedimientos de análisis y diseño de estructuras basados en las fuerzas. Sin embargo durante los últimos años se ha identificado que los parámetros más relevantes en el diseño son los desplazamientos y las deformaciones. Considerando que la metodología se basa en el método directo basado en desplazamientos, se ha promovido el uso de espectros de respuesta en coordenadas Aceleración-Desplazamiento (S_a vs S_d) para propósitos de diseño basado en el desempeño sísmico (Bonnet, 2003).

En este diagrama se grafica en el eje de las ordenadas la aceleración espectral y en las abscisas el desplazamiento espectral. Las líneas radiales que parten desde el origen, corresponden a periodos constantes. La ventaja de este formato es que la capacidad y la demanda pueden superponerse en el mismo diagrama permitiendo una solución gráfica del punto de desempeño de una estructura (Bonnet, 2003).

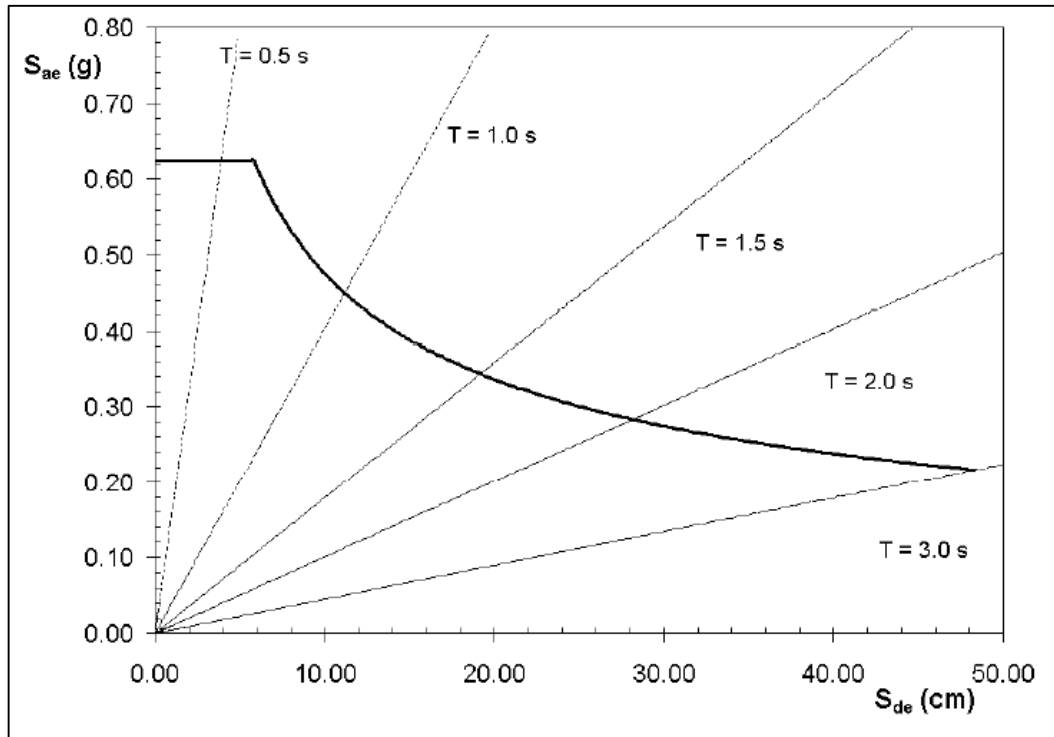


Figura 9. Espectro elástico de respuesta en formato AD (S_a vs S_d)
Fuente: (Bonnet, 2003)

2.12.1. Sismo de diseño.

Evento sísmico que tiene una probabilidad del 10% de ser excedido en 50 años (periodo de retorno de 475 años), determinado a partir de un análisis de peligrosidad sísmica del sitio de emplazamiento de la estructura o a partir de un mapa de peligro sísmico (NEC, 2015).

2.12.2. Espectro de respuesta para diseño.

La NEC (2015) lo define como un espectro de diseño representado mediante un espectro de respuesta basado en las condiciones geológicas, tectónicas, sismológicas y del tipo de suelo asociadas con el sitio de emplazamiento de la estructura. Es un espectro de tipo elástico para una fracción de amortiguamiento respecto al crítico del 5%, utilizado con fines de diseño para representar los efectos dinámicos del sismo de diseño.

A continuación se muestra el espectro sísmico elástico de aceleraciones dado por la NEC (2015), en el mismo se indican los factores, fórmulas y criterios para su elaboración.

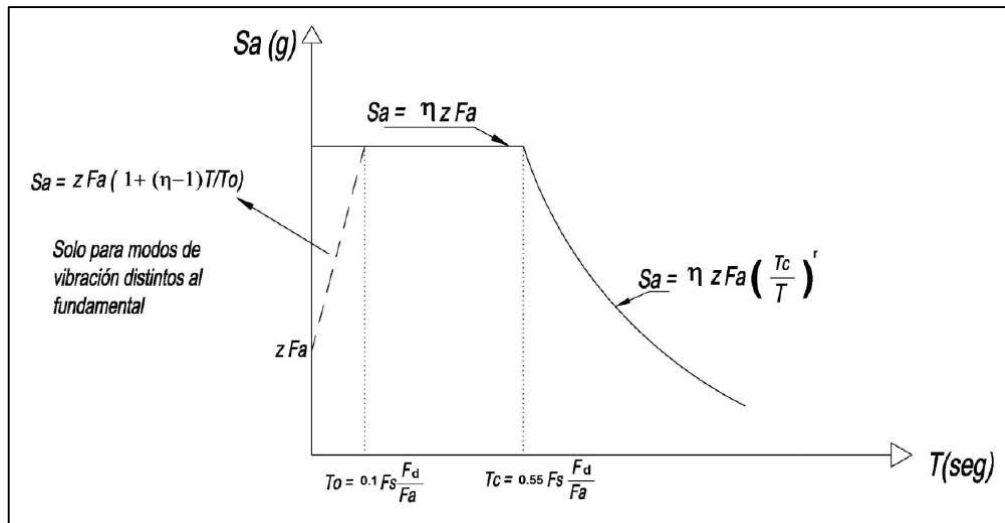


Figura 10. Espectro sísmico elástico de aceleraciones que representa el sismo de diseño
 Fuente: (NEC, 2015)

Donde:

η - Razón entre la aceleración espectral S_a ($T = 0.1s$) y el PGA para el periodo de retorno seleccionado.

F_a - Coeficiente de amplificación de suelo en la zona de periodo corto. Amplifica las ordenadas del espectro elástico de respuesta de aceleraciones para diseño en roca, considerando los efectos de sitio.

F_d - Coeficiente de amplificación de suelo. Amplifica las ordenadas del espectro elástico de respuesta de desplazamientos para diseño en roca, considerando los efectos de sitio.

F_s - Coeficiente de amplificación de suelo. Considera el comportamiento no lineal de los suelos, la degradación del periodo del sitio que depende de la intensidad y contenido de frecuencia de la excitación sísmica y los desplazamientos relativos del suelo, para los espectros de aceleraciones y desplazamientos.

S_a - Espectro de respuesta elástico de aceleraciones (expresado como fracción de la aceleración de la gravedad g). Depende del periodo o modo de vibración de la estructura.

T - Periodo fundamental de vibración de la estructura.

T_o y T_c - Periodo límite de vibración en el espectro sísmico elástico de aceleraciones que representa el sismo de diseño.

Z - Aceleración máxima en roca esperada para el sismo de diseño, expresada como fracción de la aceleración de la gravedad (g).

r - Factor usado en el espectro de diseño elástico, cuyos valores dependen de la ubicación geográfica del proyecto.

2.13. Punto de desempeño.

Superponiendo el espectro de capacidad y demanda se obtiene la respuesta máxima del edificio, en el punto de intersección de ambos espectros. Este punto es conocido como punto de desempeño y representa el máximo desplazamiento de la estructura esperado para el sismo de demanda. Una acertada estimación del punto de desempeño en una estructura es útil para el diseño de nuevas estructuras, para la rehabilitación de estructuras existentes y para el análisis de la vulnerabilidad y daño sísmico.

2.13.1. Método N2.

El método N2 ha sido desarrollado por Fajfar en la universidad de Ljubljana, donde N representa análisis no lineal y 2 por dos modelos matemáticos. El método N2 combina el análisis “pushover” de un sistema de múltiples grados de libertad con el análisis del espectro de respuesta de un sistema equivalente de un grado de libertad para determinar el punto de desempeño del sistema. El procedimiento se formula en formato aceleración-desplazamiento, el cual permite una interpretación visual del procedimiento y comprender las relaciones entre los conceptos básicos que controlan la respuesta sísmica. Generalmente, los resultados del método N2 son razonablemente adecuados especialmente para estructuras regulares dado que estas estructuras oscilan predominantemente en el primer modo (Fajfar, 2000). Su principal diferencia con otras metodologías es que la demanda sísmica se representa mediante un espectro inelástico caracterizado por la rigidez inicial y el nivel de ductilidad. Con este método no es necesario calcular el amortiguamiento viscoso equivalente ya que la no linealidad viene caracterizada por el nivel de ductilidad y la demanda requerida puede ser obtenida sin iteración.

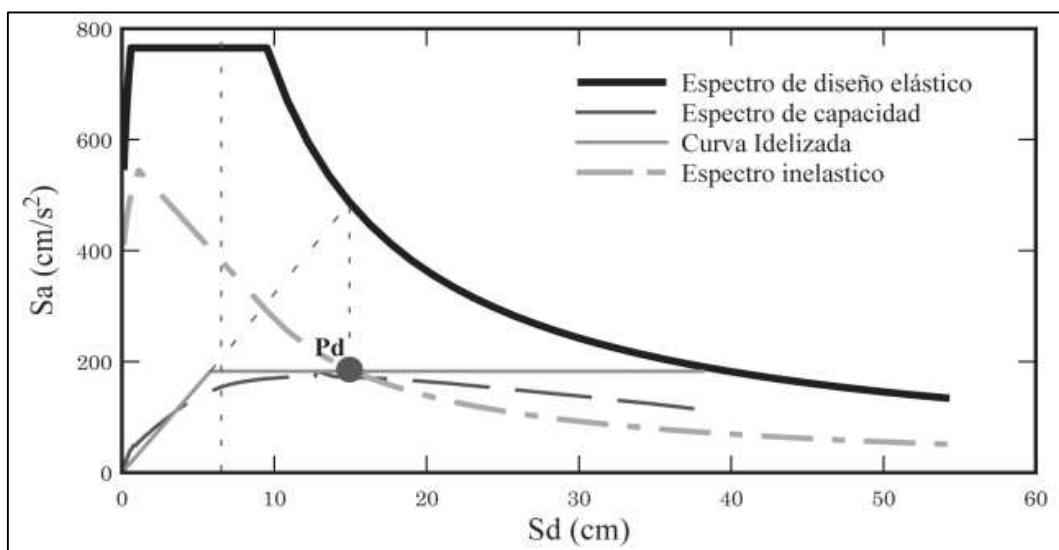


Figura 11. Punto de desempeño mediante el método N2
Fuente: (Vielma, Herrera, Ugel, Martínez & Barbat, 2013)

2.14. Daño sísmico.

El daño sísmico representa el deterioro de un sistema causado por una acción sísmica. Actualmente, existen muchos modelos para evaluar o cuantificar el daño. Sin embargo, aún no existe un criterio específico para definir los modelos de daño de forma unificada. Una estructura está compuesta por sistemas estructurales y por sistemas no estructurales. Dependiendo donde la estructura sufra daños, éstos pueden ser daños estructurales o no estructurales. El daño estructural se produce en los elementos que conforman el sistema resistente (columnas, vigas, entre otros); los elementos que no forman parte del sistema estructural resistente como por ejemplo los revestimientos, las divisiones con paredes, instalaciones son los que se consideran dentro del daño no estructural. Como medida representativa de la degradación estructural se definen estados límites de daño, los cuales se pueden definir a nivel local que representa el nivel de daño de un elemento individual, y a nivel global que representa el daño en una estructura entera (Moreno, 2006).

2.15. Estados límites de daño.

Los estados límites son un enfoque de seguridad en el cálculo estructural en ponderación de diversas normativas técnicas, instrucciones y reglas de cálculo, consiste en enumerar una serie de situaciones riesgosas cuantificables mediante una magnitud, y asegurar que con un margen de seguridad razonable que la respuesta máxima de la estructura en cada una de esas situaciones sea superior a la exigencia real sobre la estructura (EHE, 2008). También, los estados de daño representan una condición límite o tolerable establecida en función de tres aspectos fundamentales: 1) los daños físicos sobre los elementos estructurales y no estructurales, 2) el riesgo al que se encuentran expuestos los ocupantes de la edificación y 3) la funcionalidad de la edificación posterior al terremoto (Vission 2000, 1995).

Bal, Pinho, & Crowley (2010) expresan que el daño se puede estimar de diferentes maneras, algunas de las cuáles se indican a continuación:

- Estimación del daño basándose en la máxima deriva de entre piso.
- Estimación del daño basándose en el comportamiento global de la estructura.
- Estimación del daño del edificio enfocándose en deformaciones máximas alcanzadas en ciertos materiales de ciertas secciones de las estructuras.

A continuación se presentan y describen los estados límites de daño utilizados para la evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo sísmico de los edificios analizados en esta investigación. Estos estados de daño estructurales forman parte de la metodología DBELA propuesta por Crowley et al. (2006) y se basan en el comportamiento global de la estructura representado por su capacidad de desplazamiento.

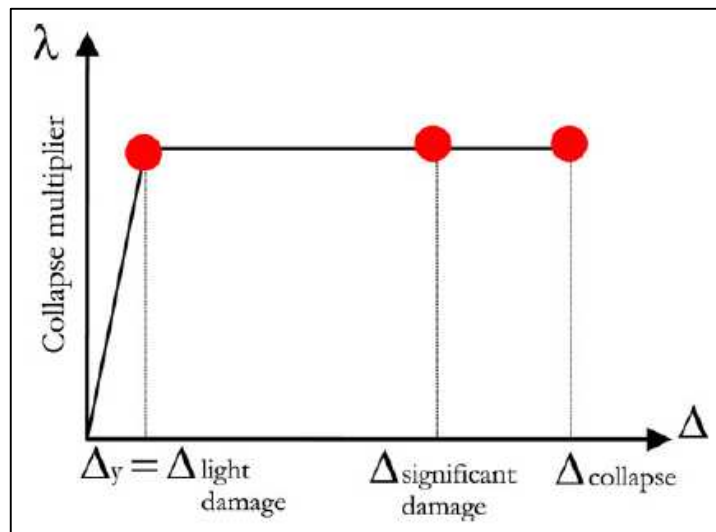


Figura 12. Representación de los estados de daño
Fuente: (Borzi, Pinho, & Crowley, 2008)

- Estado límite 1 (Daño estructural ligero).- La capacidad de desplazamiento se limita a la capacidad en el límite de fluencia. Se refiere a la situación en la que el edificio se puede utilizar después del terremoto sin la necesidad de reparación o fortalecimiento.
- Estado límite 2 (Daño estructural significativo).- La capacidad de desplazamiento se limita a $\frac{3}{4}$ de la capacidad última. Si un edificio se deforma más allá de este estado límite, no puede ser utilizado después de un terremoto sin fortalecimiento. Por otra parte, en este nivel de daño no podría ser económicamente ventajoso hacer una reparación del edificio.
- Estado límite 3 (Colapso).- La capacidad de desplazamiento se limita a la capacidad última. Si se alcanza la condición límite de colapso, el edificio se convierte en inseguro para sus habitantes ya que no es capaz de sostener cualquier fuerza lateral adicional ni las cargas de gravedad para las que ha sido diseñado. (Borzi et al., 2008)

2.16. Evaluación de la vulnerabilidad.

La evaluación de la vulnerabilidad sísmica de las zonas edificadas considera la magnitud del daño potencial que puede ser experimentado resultante de un evento sísmico. La naturaleza incierta de los eventos sísmicos y la incertidumbre en los procesos constructivos requieren el uso de un enfoque probabilístico en forma de curvas de vulnerabilidad para apreciar la vulnerabilidad sísmica. Los eventos sísmicos incluyen riesgos distintos de los terremotos tales como la licuefacción, tsunamis, deslizamientos de tierra y rupturas de las fallas superficiales. Sin embargo, estos impactos son localizados y el terremoto es el único impacto significativo en la modelación de pérdidas, envolviendo grandes partes de las regiones afectadas (Bird & Bommer, 2004).

2.16.1. Curvas de vulnerabilidad.

Las curvas de vulnerabilidad describen la probabilidad condicional de exceder un cierto estado límite de daño en función de un estimador de la acción sísmica (Borzi et al., 2008). El parámetro que define o caracteriza la acción sísmica en las curvas de vulnerabilidad suelen ser la aceleración máxima del terreno (PGA), la velocidad máxima del terreno (PGV), el desplazamiento espectral (Sd) o la aceleración espectral (Sa); el PGA y PGV se determinan a partir de una análisis de peligro sísmico del sitio. La determinación completa de las curvas de vulnerabilidad para una tipología dada requiere datos de daño para diferentes valores de la acción sísmica considerada, comprendidos entre aquel para el que no se produce daño hasta aquel para el cual la probabilidad de daño es igual a la unidad. En los valores intermedios es preciso conocer cómo se distribuyen las probabilidades de excedencia de cada estado de daño considerado. La misma probabilidad en términos discretos es una componente de la matriz de probabilidad de daños, que se emplean para estimar la probabilidad de alcanzar un estado de daño para un grupo de edificios de una misma tipología, dada una intensidad sísmica (Moreno, 2006). La aplicación de curvas de vulnerabilidad en el diseño basado en el desempeño se realiza mediante la evaluación de la fragilidad de los elementos de construcción estructurales y no estructurales, mientras que, para evaluaciones de riesgo sísmico evalúan el desempeño general de la estructura (Khalfan, 2013).

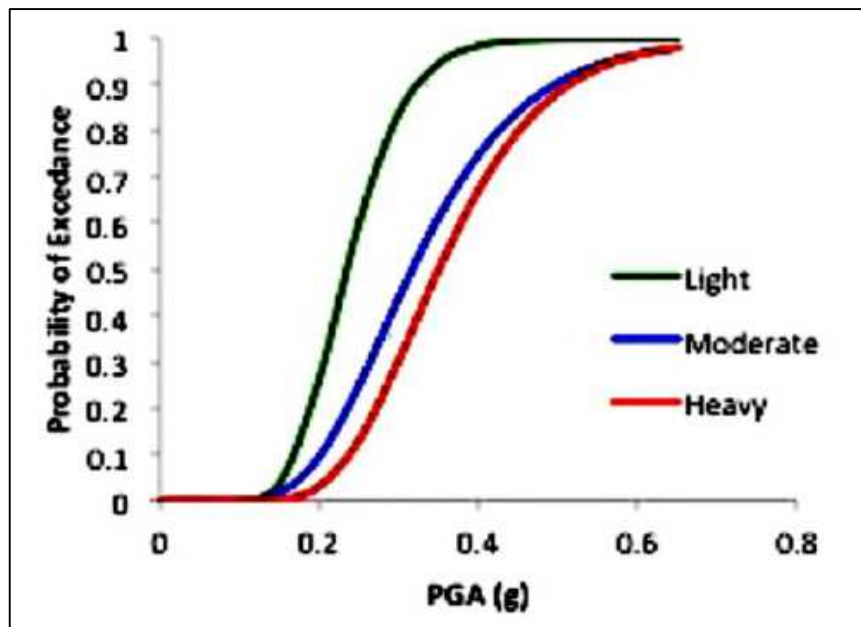


Figura 13. Curvas de vulnerabilidad para tres estados de daño
Fuente: (Khalfan, 2013)

2.16.2. Metodologías para evaluar la vulnerabilidad.

No existe una metodología estándar para estimar la vulnerabilidad sísmica de los edificios, ni de las estructuras en general. El prof. Kappos (Dolce, 1994) presenta una clasificación de las metodologías, quien las agrupa en función de la fuente de información que prevalece en tres tipos:

- Métodos empíricos.- Se caracterizan por un alto grado de subjetividad. Están basados en la experiencia sobre el comportamiento de tipos de edificaciones durante un sismo y la caracterización de deficiencias sísmicas potenciales. Se usan cuando se dispone de limitada información, cuando se admite un resultado menos ambicioso y/o para evaluaciones preliminares. Son enfoques menos exigentes y más económicos de implementar.
- Métodos analíticos o teóricos.- Evalúan la resistencia estimada de las estructuras a los movimientos del terreno utilizando como base modelos mecánicos de respuesta estructural e involucrando como datos las características mecánicas de las estructuras. Constituyen un enfoque muy completo, exigente y costoso. Generalmente son bastante laboriosos y dependen en cierta medida del grado de sofisticación de la evaluación, de la calidad de la información y de la representatividad de los modelos empleados.
- Métodos experimentales.- Recurren a ensayos dinámicos para determinar la propiedad de las estructuras y/o sus componentes. Generalmente constituyen ensayos “in situ” (menos frecuente de laboratorio), orientados a determinar las propiedades dinámicas y otras características esenciales de la estructura, involucrando aspectos tan importantes como la interacción suelo-estructura, la incidencia de los elementos no estructurales, etc. Aunque sus resultados no son determinantes, permiten en algunos casos orientar sobre el estado de la edificación y los posibles efectos que un sismo ha tenido sobre ella.

2.16.2.1. DBELA (*Displacement Based Earthquake Loss Assessment*).

DBELA (Estimación de pérdidas o daños por terremotos basándose en desplazamientos) es la metodología en la cual se fundamenta esta investigación para la obtención de curvas de vulnerabilidad. Esta metodología analítica para zonas urbanas ha estado en desarrollo durante los últimos años, utiliza los principios del método directo basado en desplazamientos. El stock de edificios se modela como una población aleatoria de clases de edificios con diferentes propiedades geométricas y materiales a través de la simulación de Monte Carlo. Luego compara para cada clase de edificios la capacidad de desplazamiento obtenida a través

de un análisis “pushover” con la demanda de desplazamiento del escenario sísmico considerado representado mediante espectros de respuesta sobre-amortiguados, obteniéndose en función de la intensidad sísmica probabilidades de daño para cada estado límite lo que deriva en curvas de vulnerabilidad.

2.17. Efectos de sitio.

Los efectos de sitio son modificaciones en amplitud, duración y contenido frecuencial que experimentan las ondas sísmicas cuando llegan a la superficie desde la roca base. Depende de la topografía, espesor y distribución de los estratos, propiedades mecánicas de los suelos (velocidades de ondas P y S, densidad, amortiguamiento), entre otros factores.

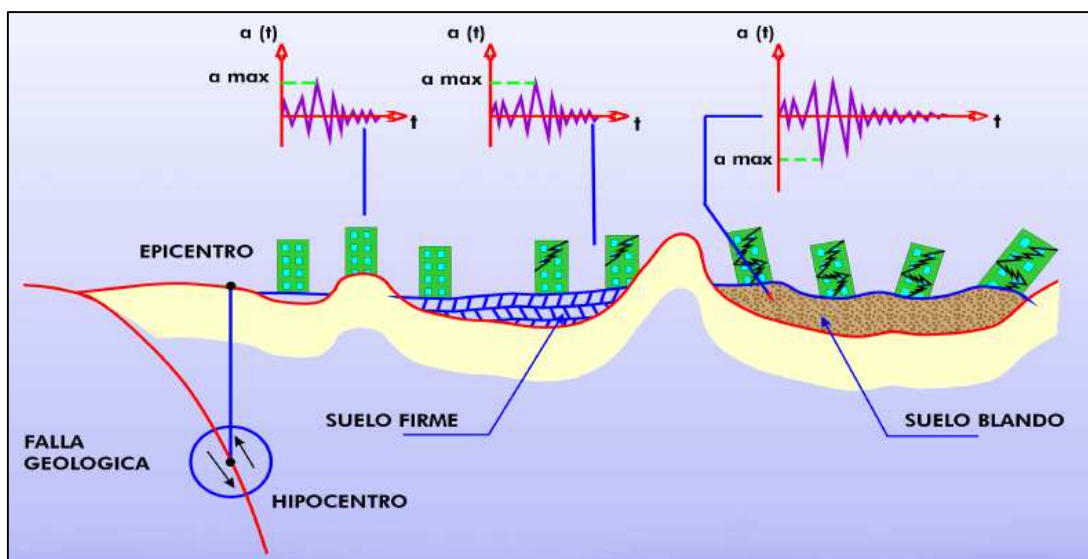


Figura 14. Efectos de sitio
Fuente: (Anguizola, 2012)

2.18. Mapa de riesgo sísmico.

Muestra la distribución espacial de elementos o zonas de diferentes grados de vulnerabilidad plasmando en forma gráfica los probables efectos del riesgo sísmico. De acuerdo a la ubicación de cada edificación se le asignará su valor de vulnerabilidad en función del grado de peligrosidad sísmica y la tipología estructural del edificio, generando mapas que representan el riesgo sísmico del sector en estudio.

Este mapa constituye una herramienta para el diseño y planificación de zonas sísmicas urbanas, permite manejar el espacio de la ciudad en lo referente a la localización de asentamientos humanos, infraestructura, actividades productivas, medidas de organización de la ciudad frente a la emergencia, favoreciendo un desarrollo sostenible (International Strategy for Disaster Reduction, 2016).

CAPÍTULO III

DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA

3.1. Introducción.

En este capítulo se describe la metodología utilizada para el estudio preliminar del riesgo sísmico en la zona urbana 3 de la ciudad de Loja. Primeramente se indica la división de la zona urbana y el método utilizado para la recopilación de información en la zona de estudio, así como el proceso y criterio establecido para la clasificación de las edificaciones en categorías estructurales, luego se expone el procedimiento utilizado para la modelación estructural y finalmente se muestra la metodología empleada para obtener los espectros de demanda sísmica, puntos de desempeño, curvas de vulnerabilidad y mapas de riesgo sísmico.

3.2. División de la zona urbana de la ciudad de Loja.

El área urbana de la ciudad se dividió en cinco zonas de estudio en función de la densidad y características de los edificios existentes. En la presente investigación se trabaja en la zona número 3 que abarca un área de 12.5 Km^2 , aproximadamente un 22% del total de la zona urbana.

En la figura 15 se muestra las zonas para el estudio del riesgo sísmico establecidas en esta investigación.

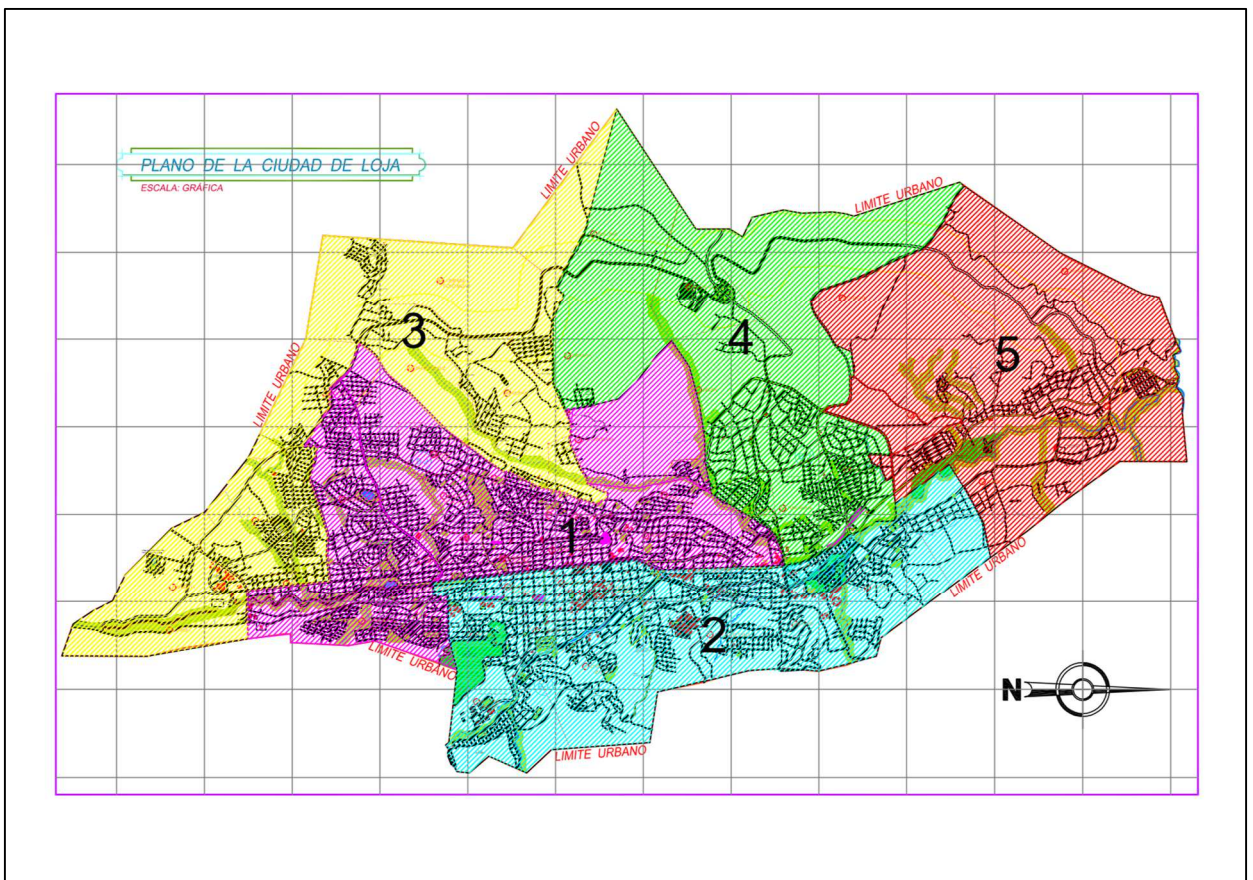


Figura 15. Zonas de estudio del área urbana de la ciudad de Loja.
Fuente: (Municipio de Loja, 2014)

En la figura 16 se muestra la zona urbana 3 de la ciudad de Loja comprendida entre la línea de color azul (perímetro urbano) y la de color negro. Al norte el límite lo conforma la Av. Villonaco, al este la Av. Eugenio Espejo, la Vía de Integración Barrial, la Av. José Vivar, la Av. Pío Jaramillo y el perímetro urbano, al sur y al oeste el perímetro urbano.

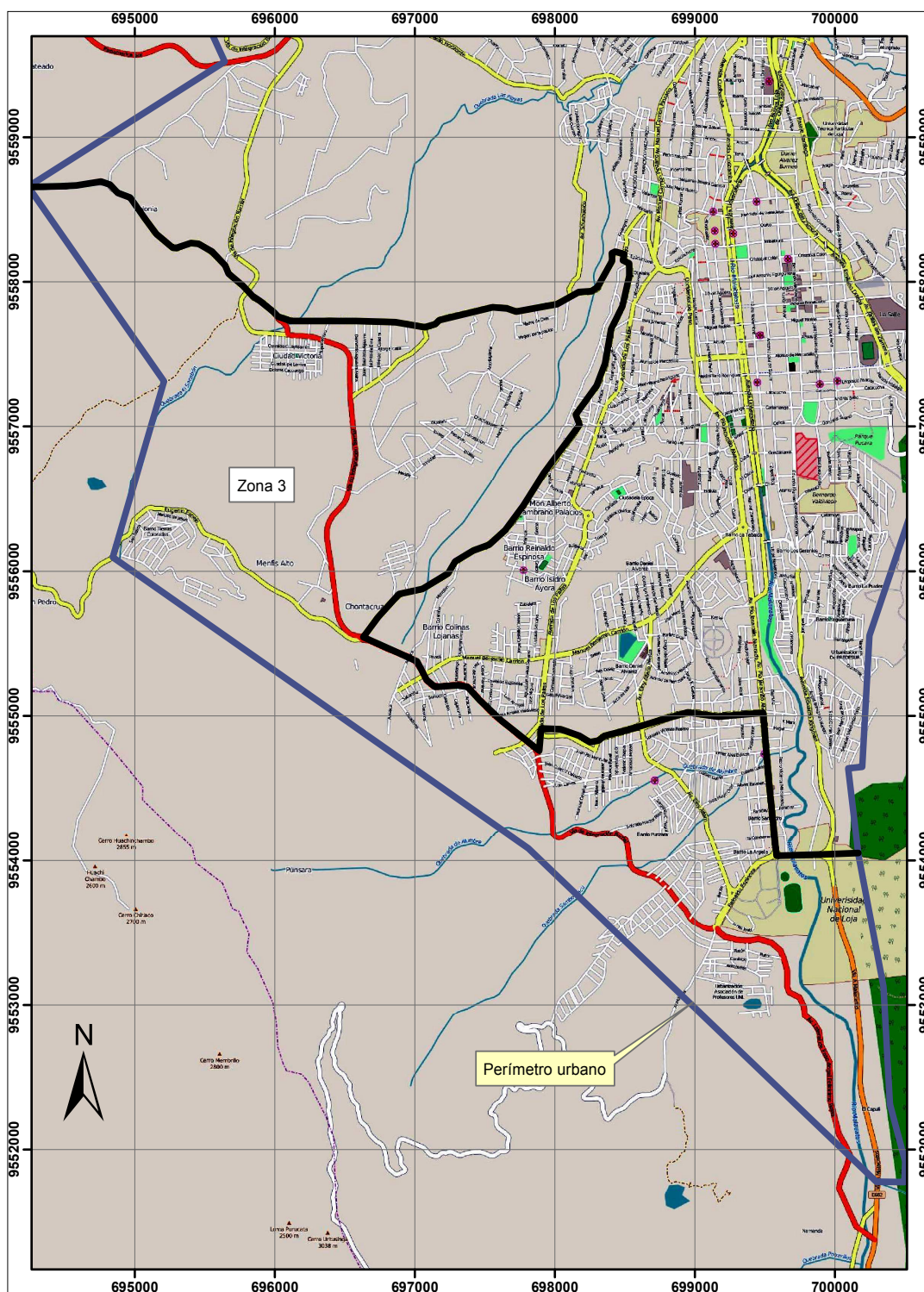


Figura 16. Zona urbana 3 de la ciudad de Loja
Fuente: (OpenStreetMap, 2016)

3.3. Recopilación de información estructural en la zona de estudio.

En la presente investigación se generó una base de datos de información estructural de acuerdo a la taxonomía del GEM de una muestra que abarca 2801 edificaciones (considerando su respectiva distribución espacial), aproximadamente el 50% del total en la zona de estudio.

Esta información se obtuvo a través de las herramientas de captura de inventario IDCT (Inventory Data Capture Tools) del GEM, las mismas se crearon para que los usuarios puedan recoger y modificar información de edificios que se encuentran en exposición, esta información puede ser usada en la base de datos global de exposición y consecuencias ante un terremoto del GEM, creando una nueva fuente de información que servirá para futuras investigaciones. Estas herramientas han sido desarrolladas para dispositivos que utilizan el sistema operativo Android o Windows y utilizan una interfaz gráfica para marcar los puntos de muestreo y definir una serie de atributos acerca de las características estructurales (taxonomía) de las edificaciones y el eventual daño ante un terremoto. En el anexo A se muestra el IDCT utilizado en esta investigación para el levantamiento de información.



Figura 17. Ventana principal del IDCT para aplicación móvil
Fuente: (IDCT DO SURVEY, 2016)

A continuación se muestra información estadística obtenida a partir de la base de datos de información estructural de acuerdo al GEM.

En la tabla 1 se presenta la participación de las edificaciones dentro de la muestra analizada, en función del material del sistema estructural.

Tabla 1. Participación de las edificaciones en función del material del sistema estructural.

| Material del sistema estructural | Participación (%) |
|----------------------------------|-------------------|
| Hormigón armado | 91 |
| Mampostería | 1 |
| Acero | 1 |
| Madera | 7 |

Fuente y elaboración: El autor

La tabla 1 muestra que las edificaciones de hormigón armado tienen un factor de participación igual a 91%, seguido de las edificaciones de madera con un factor igual a 7%. El 2% restante lo conforman edificaciones de mampostería y acero.

De los resultados obtenidos para edificaciones de HA (hormigón armado) se muestra información de variables como: número de pisos, año de construcción, forma del sistema y material de la cubierta de techo, ocupación, tecnología del hormigón y material de relleno del marco, irregularidad en planta e irregularidad en elevación.

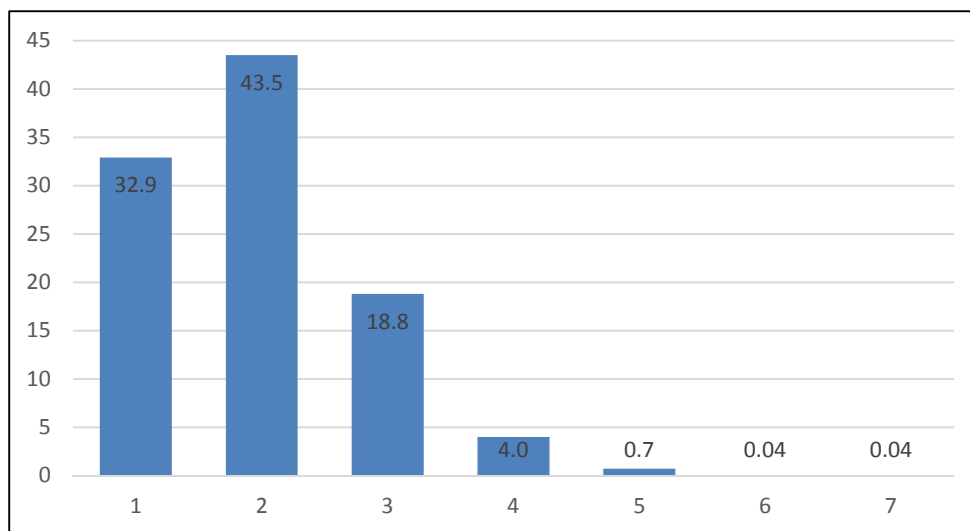


Figura 18. Histograma de edificaciones de HA en función del número de pisos.
Fuente y Elaboración: El autor

La figura 18 muestra que las edificaciones de hormigón armado de 1 a 4 pisos representan el 99% de la muestra dentro de este sistema estructural. La distribución de las estructuras de HA en función del número de pisos permite definir categorías estructurales con la finalidad de generalizar el análisis de vulnerabilidad sísmica de las estructuras comprendidas dentro de cada categoría.

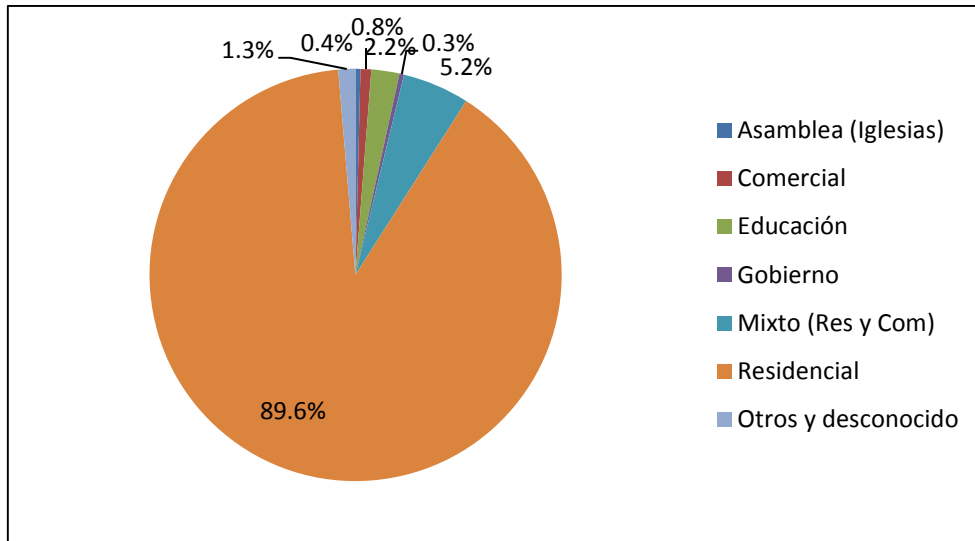


Figura 19. Tipología de ocupación en estructuras de HA
Fuente y Elaboración: El autor

Las figura 19 muestra que la ocupación en edificaciones de HA se concentra en el uso residencial con un 90%; en esta investigación se considera los usos residencial, comercial y mixto, esto se debe a la configuración estructural similar en estas tipologías y a su participación (96%) dentro del total de edificaciones de HA. Las edificaciones de hormigón armado de estas tipologías en su totalidad están conformadas por sistemas estructurales tipo pórticos.

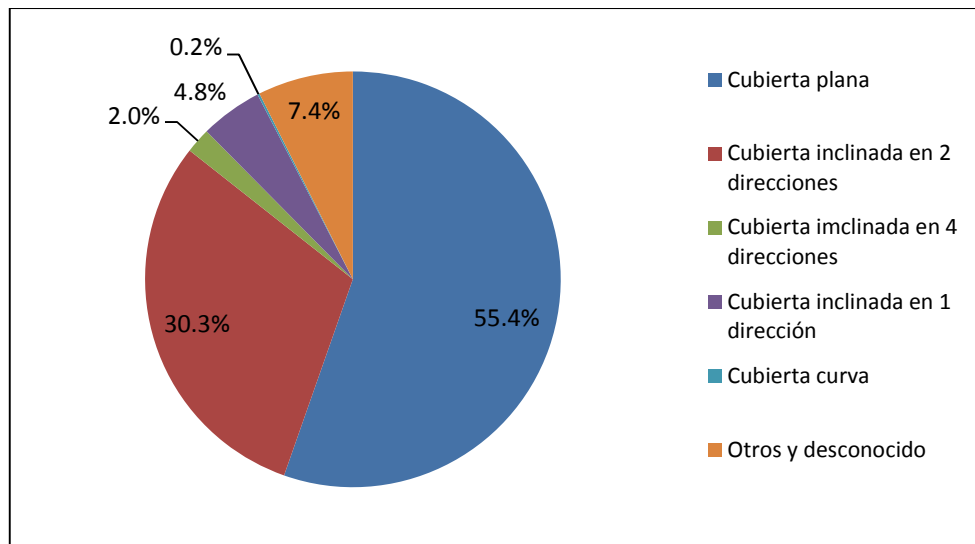


Figura 20. Forma del sistema de techo en estructuras de HA
Fuente y Elaboración: El autor

La figura 20 muestra que en las estructuras de HA, la forma del sistema de techo se concentra en los tipos cubierta plana y cubierta inclinada en dos direcciones con una participación del 55 y 30% respectivamente.

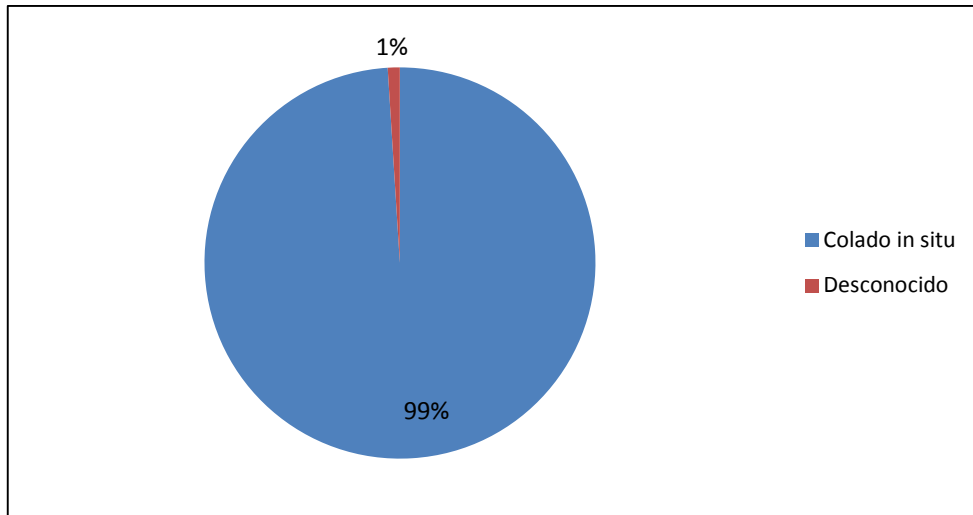


Figura 21. Tecnología del hormigón del marco de las estructuras de HA
Fuente y Elaboración: El autor

La figura 21 muestra que en las estructuras de HA la tecnología del hormigón del tipo colado in situ representa el 99%, en nuestro medio los procesos constructivos prácticamente en su totalidad utilizan esta tecnología al contrario de otras prácticas constructivas en las cuáles los prefabricados de hormigón han ganado una gran aceptación.

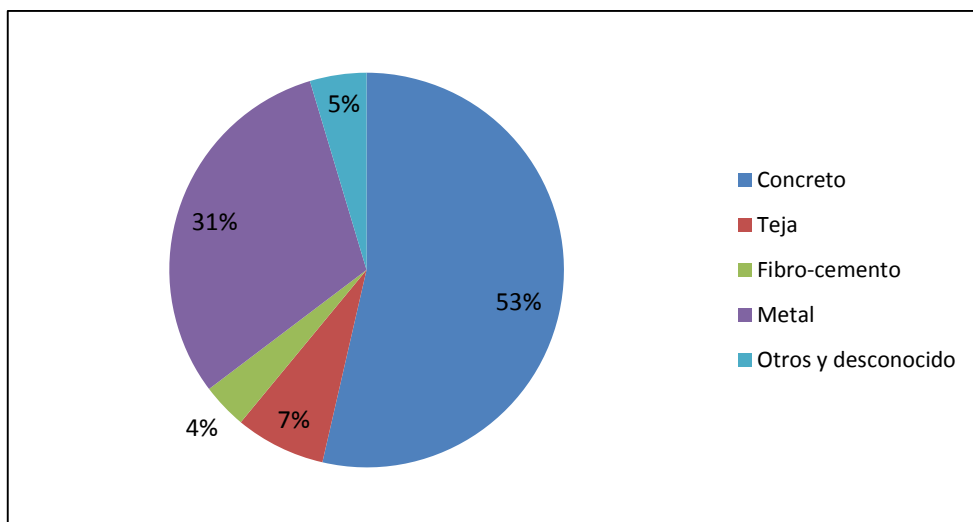


Figura 22. Material de la cubierta de techo en estructuras de HA
Fuente y Elaboración: El autor

La figura 22 muestra que en las estructuras de HA, el material de la cubierta de techo se concentra en los tipos concreto y metal con una participación del 53 y 31% respectivamente. Generalmente las cubiertas de techo de forma plana están fabricadas en concreto y las cubiertas inclinadas en dos direcciones están fabricadas en metal.

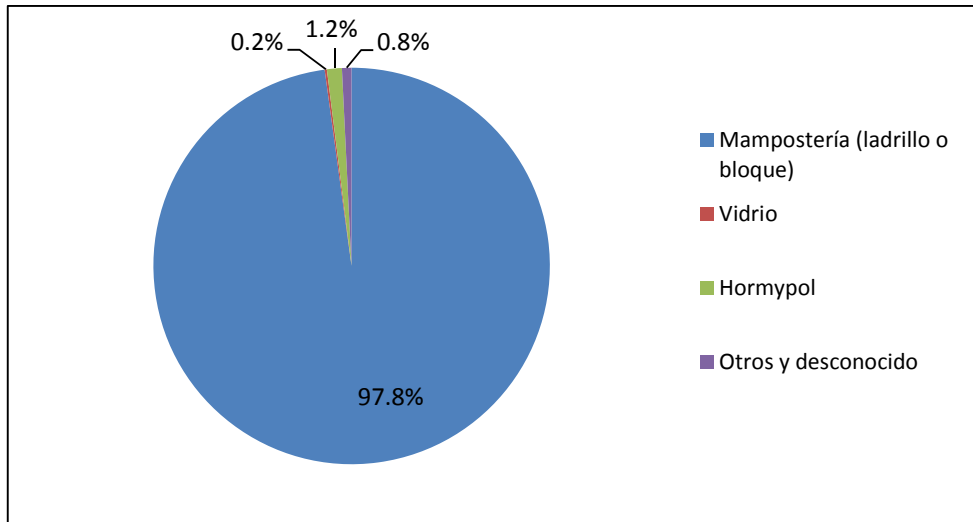


Figura 23. Material de relleno de los marcos de las estructuras de HA
Fuente y Elaboración: El autor

La figura 23 muestra que en las estructuras de HA, el material de relleno de los marcos se concentra en el tipo mampostería (ladrillo o bloque) con una participación del 98%. Para la presente investigación no se consideró la interacción entre el marco estructural y la mampostería, esta se considera en el modelo como carga gravitacional.

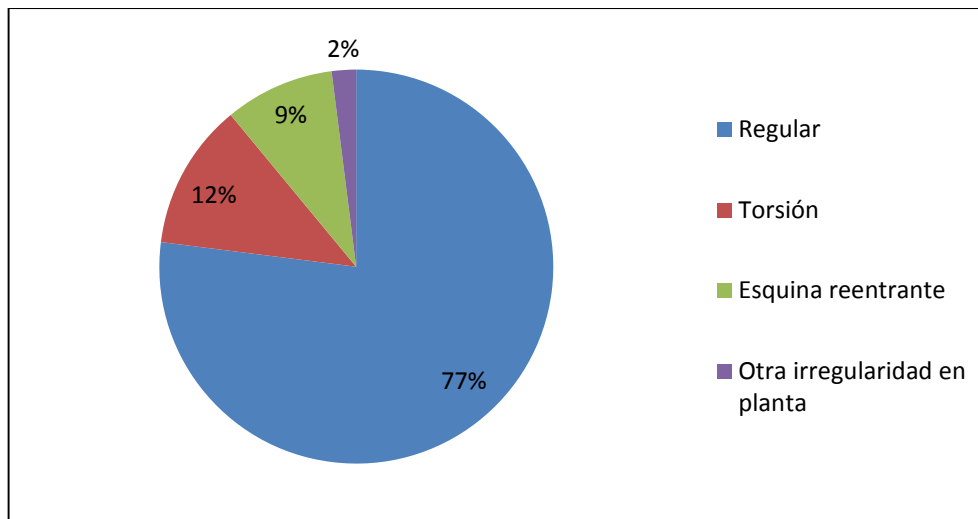


Figura 24. Irregularidad estructural en planta observada en estructuras de HA
Fuente y Elaboración: El autor

La figura 24 muestra que en las estructuras de HA, la irregularidad en planta observada o visible se concentra en los tipos torsión y esquina reentrante con una participación de 12 y 9% respectivamente.

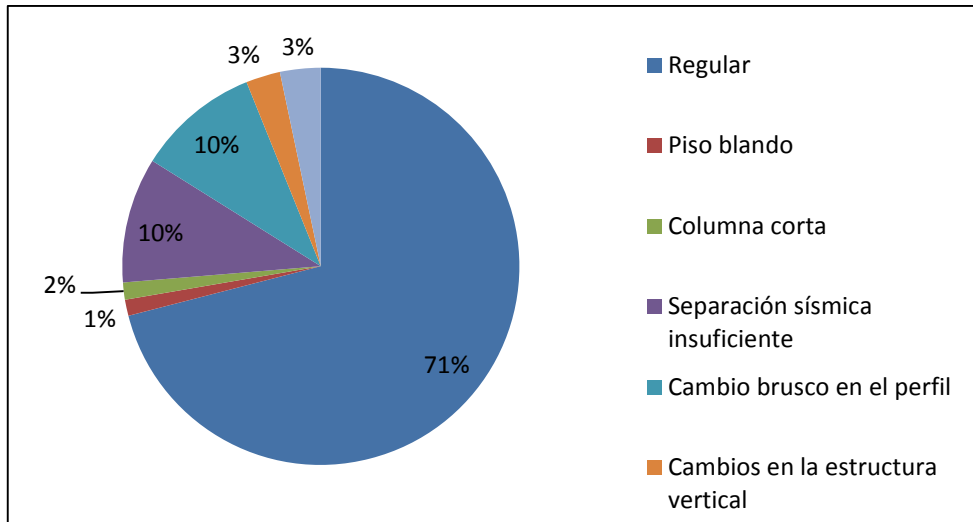


Figura 25. Irregularidad estructural en elevación observada en estructuras de HA
Fuente y Elaboración: El autor

La figura 25 muestra que en las estructuras de HA la irregularidad estructural en elevación observada o visible se concentra en los tipos separación sísmica insuficiente y cambio brusco en el perfil con una participación para cada uno igual a 10%.

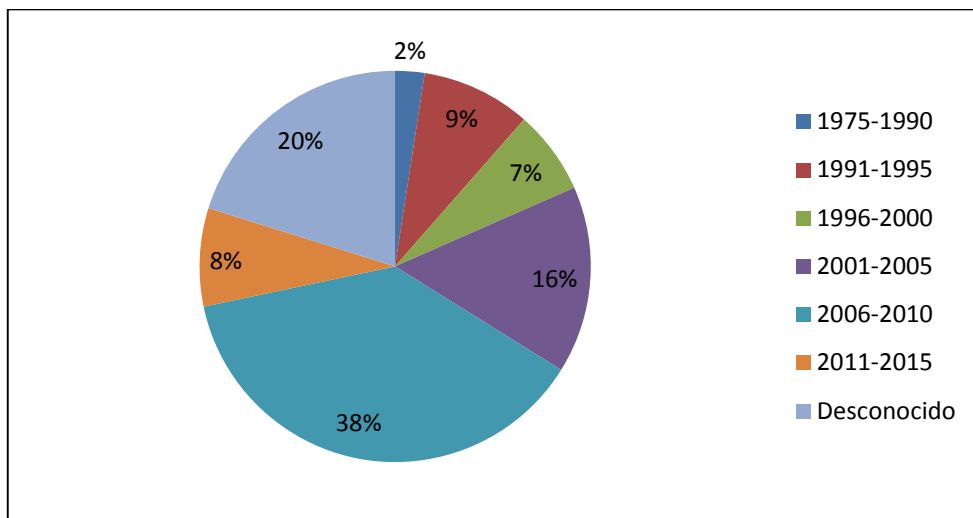


Figura 26. Año de construcción aproximado de las estructuras de HA
Fuente y Elaboración: El autor

La figura 26 muestra que en el periodo 2006-2010 se registra el mayor número de construcciones en la zona de estudio, esto se debe a que en este periodo se ejecutaron proyectos de vivienda por parte de la municipalidad de la ciudad. Con la información utilizada para elaborar la figura 22 se obtiene un promedio de 13 años de antigüedad de las estructuras de HA.

3.4. Categorización de las edificaciones.

Considerando que cada sistema estructural responde de manera distinta cuando se somete a solicitaciones sísmicas; aspectos como la configuración estructural, simetría, distribución de la masa, regularidad en planta y vertical, además la resistencia, rigidez y ductilidad son aspectos de importancia para una adecuada respuesta sísmica de las estructuras (Paulay & Priestley, 1992), por esta razón es fundamental realizar una correcta categorización de las edificaciones.

Basándose en la información estructural mostrada en el apartado anterior se procede a clasificar las edificaciones en diferentes categorías, recordando que esta investigación se enfoca en edificaciones de hormigón armado de uso residencial, comercial y mixto (residencial y comercial) que representan el 85% del total de la muestra. Se establecen cuatro tipologías estructurales considerando las características más representativas en la respuesta sísmica de las estructuras, entre estas tenemos: sistema estructural, se considera el tipo pórticos de hormigón armado ya que este sistema abarca la totalidad de las estructuras en estudio; número de pisos, se considera de 1 a 4 ya que estos representan el 99% dentro del sistema estructural antes mencionado y el número de vanos, se selecciona en base a una inspección visual de las estructuras de la muestra.

La información referente a características geométricas de cada categoría se obtiene de Sarango (2013) y de una recopilación de planos estructurales de las edificaciones en análisis del sector en estudio, esta información se somete a un análisis estadístico con estos tipos de distribución probabilística (Gamma, Log-Normal y Normal), se hace uso de la prueba de Kolmogórov-Smirnov para comprobar la bondad de ajuste entre las distribuciones, se escoge aquella que represente el mejor factor de correlación. Las mismas representan las principales propiedades geométricas para el modelado de las estructuras, entre estas tenemos: espesor de losa, longitud de vano, altura de entrepiso, altura y base de viga y ancho de columna en la dirección x, y.

A continuación se muestra las categorías establecidas en esta investigación con la correspondiente información referente a la configuración estructural, se considera igual número de vanos en ambas direcciones x, y. Por lo tanto, estructuras regulares se obtiene; este criterio se justifica en la información previa en la cual se muestra que aproximadamente un 75% de las edificaciones de hormigón armado no presentan irregularidad estructural.

3.4.1. Categoría 1.

Corresponde a edificaciones aporticadas de hormigón armado de 1 piso y 3 vanos en x, y.

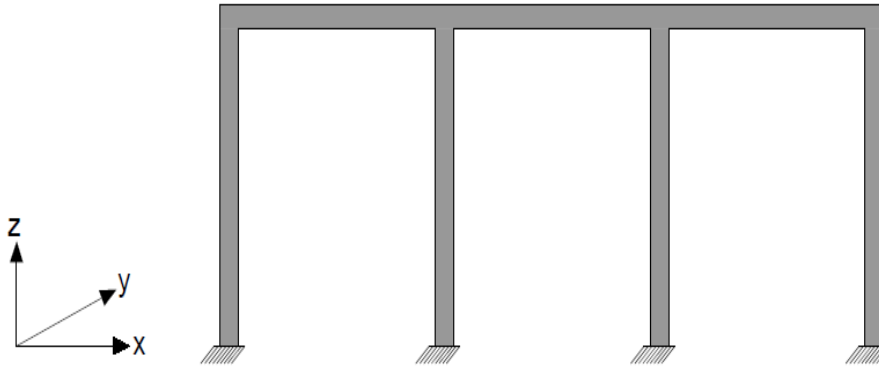


Figura 27. Modelo de pórtico plano equivalente – Categoría 1

Fuente y Elaboración: El autor

En la tabla 2 y figura 28 se muestra las funciones de distribución de probabilidad que representan las características geométricas de la categoría 1.

Tabla 2. Información estadística generada para el análisis de la categoría 1.

| Descripción | Distribución | Media | Desviación Estándar | Límite superior | Límite inferior |
|----------------------------------|--------------|-------|---------------------|-----------------|-----------------|
| Espesor de losa (m) | Log-normal | 0.202 | 0.053 | 0.255 | 0.149 |
| Longitud de vano (m) | Log-normal | 3.575 | 0.731 | 4.306 | 2.844 |
| Altura de entrepiso (m) | Normal | 2.633 | 0.207 | 2.840 | 2.426 |
| Altura de viga (m) | Log-normal | 0.218 | 0.049 | 0.267 | 0.169 |
| Base de viga (m) | Log-normal | 0.227 | 0.050 | 0.276 | 0.177 |
| Ancho de columna dirección X (m) | Log-normal | 0.223 | 0.048 | 0.272 | 0.175 |
| Ancho de columna dirección Y (m) | Log-normal | 0.227 | 0.051 | 0.278 | 0.175 |

Fuente y Elaboración: El autor

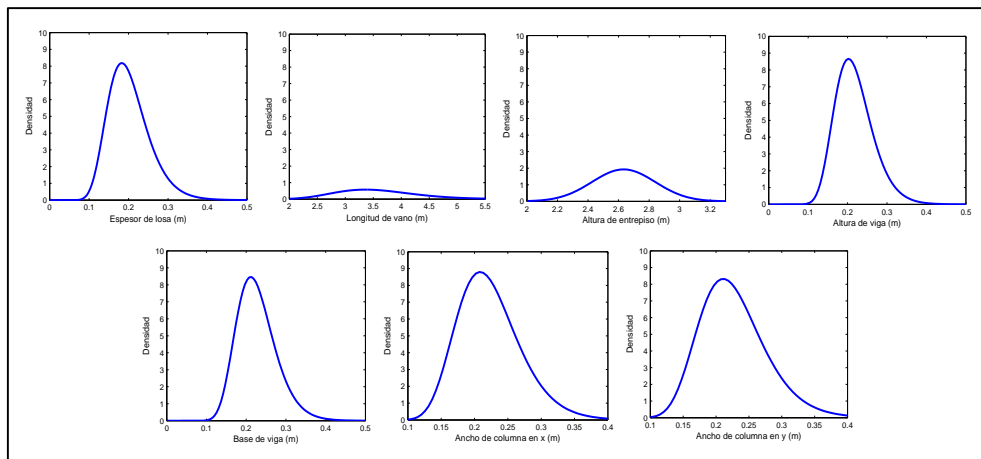


Figura 28. Gráficas de las funciones de distribución de probabilidad – Categoría 1

Fuente y Elaboración: El autor

3.4.2. Categoría 2.

Corresponde a edificaciones aporticadas de hormigón armado de 2 pisos y 3 vanos en x, y.

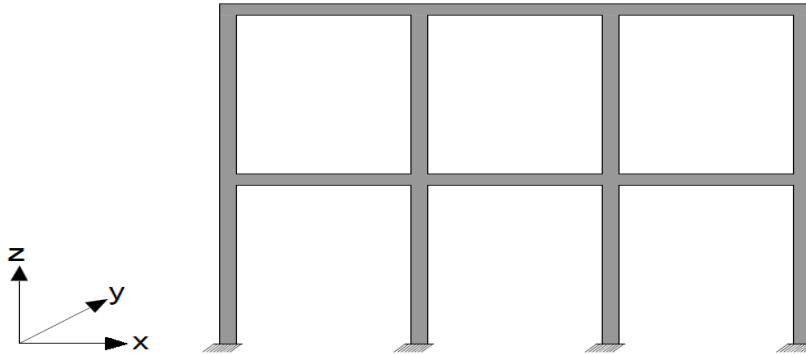


Figura 29. Modelo de pórtico plano equivalente – **Categoría 2**
Fuente y Elaboración: El autor

En la tabla 3 y figura 30 se muestra las funciones de distribución de probabilidad que representan las características geométricas de la categoría 2.

Tabla 3. Información estadística generada para el análisis de la **categoría 2**.

| Descripción | Distribución | Media | Desviación Estándar | Límite superior | Límite inferior |
|----------------------------------|--------------|-------|---------------------|-----------------|-----------------|
| Espesor de losa (m) | Normal | 0.229 | 0.070 | 0.298 | 0.159 |
| Longitud de vano (m) | Normal | 4.026 | 0.836 | 4.862 | 3.189 |
| Altura de entrepiso (m) | Log-normal | 2.821 | 0.384 | 3.205 | 2.438 |
| Altura de viga (m) | Log-normal | 0.279 | 0.068 | 0.347 | 0.210 |
| Base de viga (m) | Log-normal | 0.243 | 0.053 | 0.296 | 0.189 |
| Ancho de columna dirección X (m) | Log-normal | 0.276 | 0.057 | 0.333 | 0.219 |
| Ancho de columna dirección Y (m) | Log-normal | 0.279 | 0.056 | 0.335 | 0.222 |

Fuente y Elaboración: El autor

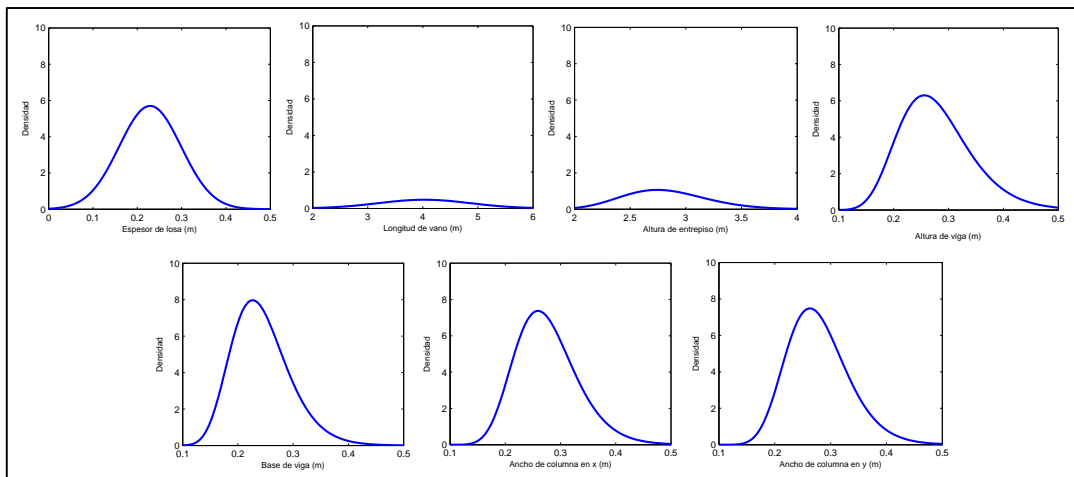


Figura 30. Gráficas de las funciones de distribución de probabilidad – **Categoría 2**
Fuente y Elaboración: El autor

3.4.3. Categoría 3.

Corresponde a edificaciones aporticadas de hormigón armado de 3 pisos y 4 vanos en x, y.

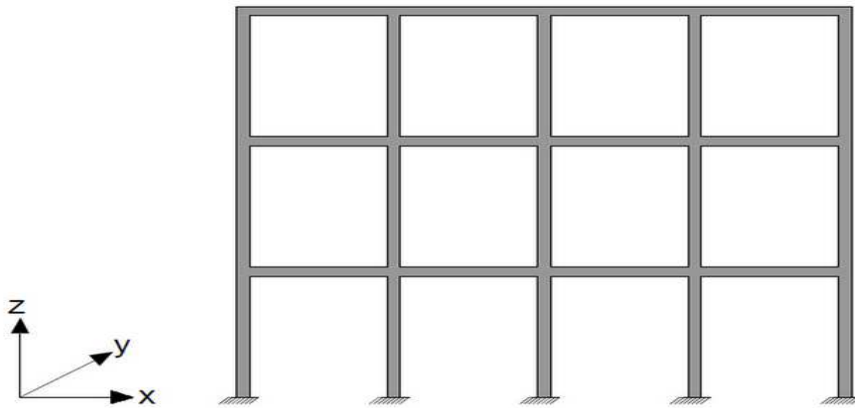


Figura 31. Modelo de pórtico plano equivalente – **Categoría 3**
Fuente y Elaboración: El autor

En la tabla 4 y figura 32 se muestra las funciones de distribución de probabilidad que representan las características geométricas de la categoría 3.

Tabla 4. Información estadística generada para el análisis de la **categoría 3**.

| Descripción | Distribución | Media | Desviación Estándar | Límite superior | Límite inferior |
|----------------------------------|--------------|-------|---------------------|-----------------|-----------------|
| Espesor de losa (m) | Normal | 0.244 | 0.043 | 0.287 | 0.201 |
| Longitud de vano (m) | Normal | 3.794 | 0.657 | 4.452 | 3.137 |
| Altura de entrepiso (m) | Log-normal | 2.786 | 0.170 | 2.956 | 2.616 |
| Altura de viga (m) | Normal | 0.365 | 0.086 | 0.451 | 0.279 |
| Base de viga (m) | Normal | 0.279 | 0.041 | 0.320 | 0.238 |
| Ancho de columna dirección X (m) | Normal | 0.310 | 0.043 | 0.353 | 0.268 |
| Ancho de columna dirección Y (m) | Normal | 0.352 | 0.076 | 0.428 | 0.276 |

Fuente y Elaboración: El autor

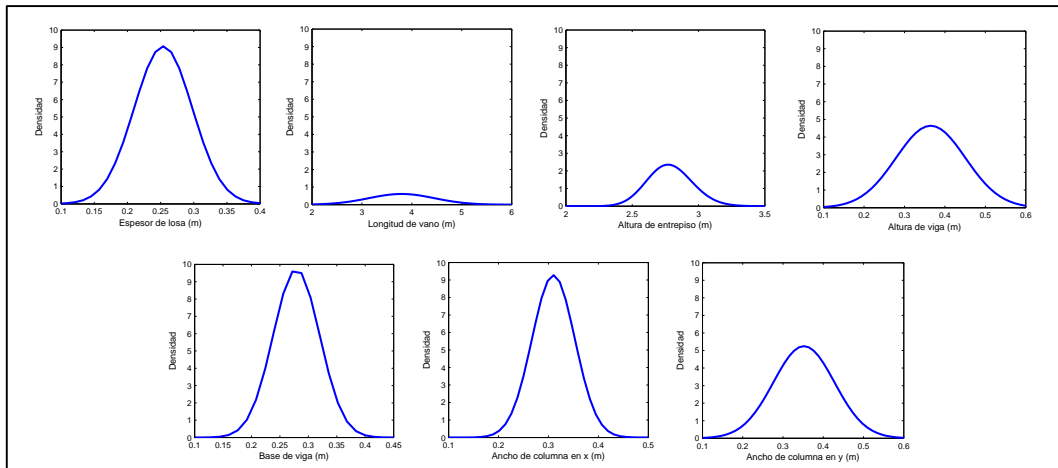


Figura 32. Gráficas de las funciones de distribución de probabilidad – **Categoría 3**
Fuente y Elaboración: El autor

3.4.4. Categoría 4.

Corresponde a edificaciones aporticadas de hormigón armado de 4 pisos y 5 vanos en x, y.

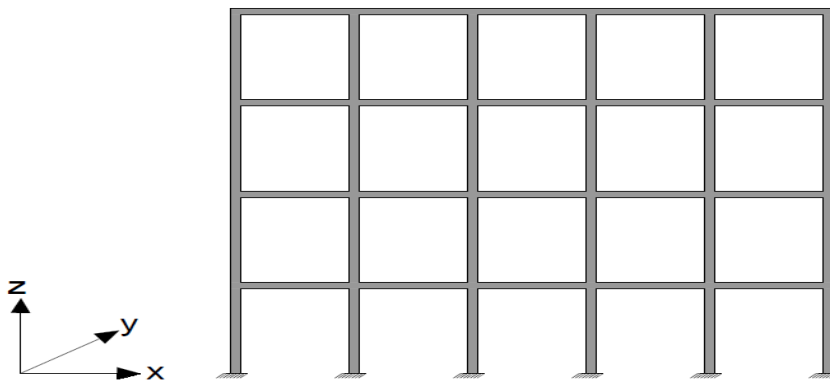


Figura 33. Modelo de pórtico plano equivalente – **Categoría 4**
Fuente y Elaboración: El autor

En la tabla 5 y figura 34 se muestra las funciones de distribución de probabilidad que representan las características geométricas de la categoría 4.

Tabla 5. Información estadística generada para el análisis de la **categoría 4.**

| Descripción | Distribución | Media | Desviación Estándar | Límite superior | Límite inferior |
|----------------------------------|--------------|-------|---------------------|-----------------|-----------------|
| Espesor de losa (m) | Normal | 0.271 | 0.027 | 0.298 | 0.245 |
| Longitud de vano (m) | Normal | 3.486 | 0.620 | 4.106 | 2.865 |
| Altura de entrepiso (m) | Log-normal | 2.807 | 0.151 | 2.958 | 2.656 |
| Altura de viga (m) | Log-normal | 0.371 | 0.052 | 0.422 | 0.319 |
| Base de viga (m) | Normal | 0.294 | 0.033 | 0.327 | 0.262 |
| Ancho de columna dirección X (m) | Normal | 0.333 | 0.028 | 0.361 | 0.306 |
| Ancho de columna dirección Y (m) | Normal | 0.378 | 0.065 | 0.442 | 0.313 |

Fuente y Elaboración: El autor

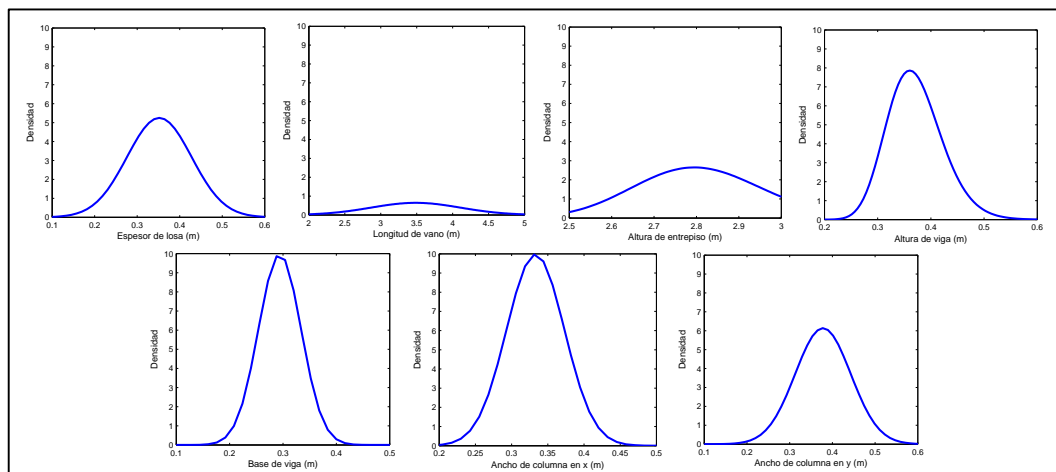


Figura 34. Gráficas de las funciones de distribución de probabilidad – **Categoría 4**
Fuente y Elaboración: El autor

3.5. Modelación estructural.

Basándose en información previa se modelan pórticos planos de hormigón armado que representan las edificaciones de cada tipología estructural. Su configuración estructural es regular, el entrepiso y techo se consideran como losas planas, la carga gravitacional de mampostería, losa y vigas se considera en forma distribuida, mientras que la carga de columnas se considera puntual; se utiliza la combinación de cargas y carga viva de acuerdo al NEC (2015).

3.5.1. Generación de elementos estructurales.

Estos están conformados por concreto no confinado (material de recubrimiento), concreto confinado (material del núcleo) y barras de refuerzo de acero. A continuación se presenta los modelos y criterios utilizados para simular el concreto y acero en los elementos estructurales.

3.5.1.1. Concreto.

La resistencia del concreto a compresión se determina en base a una investigación realizada por Patricia Duque en el año 2011 para el sector sur de la ciudad de Loja, la cual establece una media de 12 *MPa* con una desviación estándar de 5. Tomando en cuenta la resistencia a compresión del hormigón se establece un factor de confinamiento igual a 0.002 y una densidad de $2.55 \frac{\text{Ton}}{\text{m}^3}$.

Se consideran dos modelos de hormigón de acuerdo al catálogo de Opensees para simular el hormigón de los elementos estructurales (vigas y columnas): el Concrete04 simula el material del núcleo y el Concrete01 simula el material del recubrimiento.

- Concrete04 (Concreto confinado).- Se utiliza para construir un material uniaxial con degradación lineal de rigidez-carga. Este material considera además un esfuerzo a tensión con un descenso exponencial (Karsan & Jirsa, 1969).

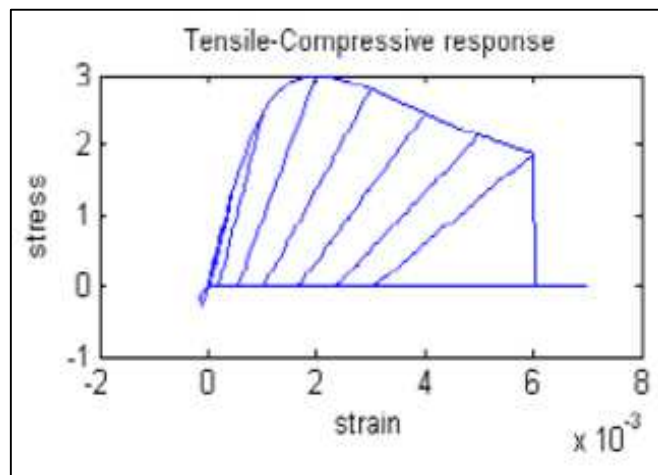


Figura 35. Diagrama esfuerzo-deformación Concrete04
Fuente: (Manual de usuario Opensees)

- Concrete01 (Concreto no confinado).- Representa un concreto que no posee resistencia a la tensión. Es un modelo propuesto por Kent – Scott – Park (1971) con degradación lineal de rigidez carga-descarga de acuerdo con el trabajo de Karsan & Jirsa (Karsan & Jirsa, 1969).

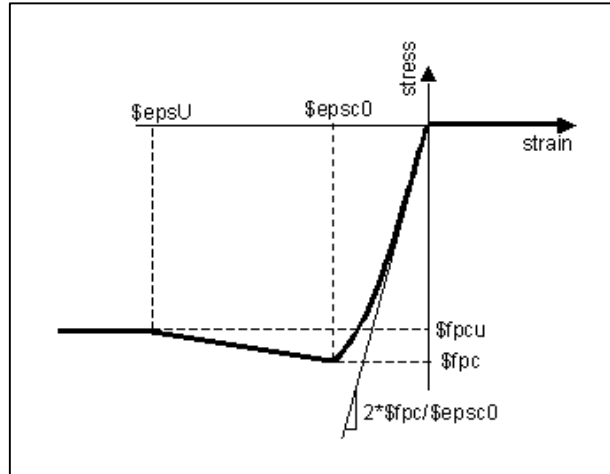


Figura 36. Diagrama esfuerzo-deformación Concrete01
Fuente: (Manual de usuario Opensees)

3.5.1.2. Acero.

Las edificaciones de hormigón armado en la zona de estudio tienen un promedio de 13 años de antigüedad, tomando como criterio el año de construcción se tomó un valor límite de fluencia igual a 420 MPa , para lo cual se asumió una edad crítica de 50 años. Se considera el modelo de acero Steel01 de acuerdo al catálogo de Opensees para simular las barras de acero en los elementos estructurales (vigas y columnas).

- Acero (Steel01).- Este tipo de material representa acero con propiedades esfuerzo-deformación que siguen un diagrama bilineal con endurecimiento cinemático y endurecimiento isotrópico descrito por una ecuación no lineal (Mendoza, 2012).

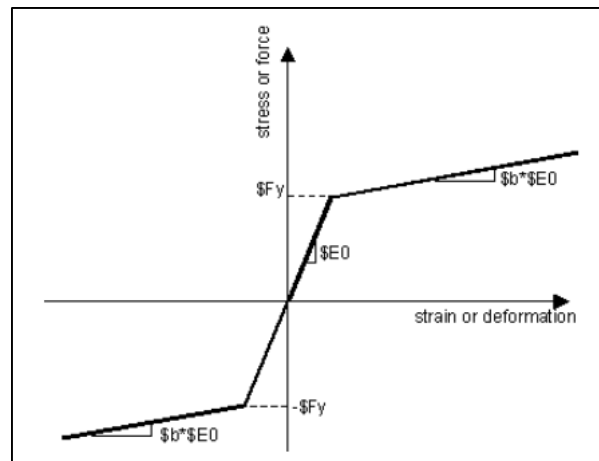


Figura 37. Diagrama esfuerzo-deformación Steel01
Fuente: (Manual de usuario Opensees)

En la presente investigación se determina las cantidades de acero asumiendo como hipótesis la cuantía necesaria requerida por cálculo (mayor o igual a la cuantía mínima) en base a un análisis por resistencia. Esto se debe a la falta de instrumentos, permisos, entre otros factores, que permitan determinar las cantidades de acero de las edificaciones muestreadas.

3.5.2. Número de modelaciones.

El criterio para la modelación es el de abarcar todas las estructuras en la zona de estudio, considerando que el análisis es más preciso a mayor número de simulaciones, pero por razones operativas se permite por categoría un número máximo de simulaciones aproximadamente igual a 500, número de simulaciones que representan perfectamente el comportamiento estructural de la tipología en análisis en el caso de que el número de estructuras sea mayor.

3.5.3. Código en matlab con extensión a Opensees.

Utilizado para obtener la capacidad estructural de las tipologías de edificaciones definidas en esta investigación. A través de las funciones de distribución de probabilidad generadas para la tipología en análisis se genera un pórtico plano que representa la edificación con características geométricas y propiedades de materiales aleatorias. Luego se somete a un análisis estático no lineal “pushover” (basado en fibras) en el software Opensees obteniéndose la curva de capacidad con el cortante en la base en el eje de las abscisas y el desplazamiento lateral en el techo del edificio en el eje de las ordenadas, esta curva se transforma a espectro de capacidad comparable con la demanda sísmica para lo cual se necesita conocer las propiedades dinámicas de la estructura (modos de vibración, factor de participación modal, coeficiente de masa efectiva), de forma que el cortante en la base se transforma a aceleración espectral y el desplazamiento en el techo a desplazamiento espectral para luego ser representada bilinealmente con un criterio de balance de energía con la finalidad de tener parámetros objetivos y cuantificables respecto al comportamiento de la estructura. Finalmente utilizando la simulación de Monte Carlo se obtiene el espectro de capacidad promedio que representa la capacidad estructural de la tipología en análisis, esto se consigue mediante un proceso iterativo de análisis estructural de cada edificación generada aleatoriamente de acuerdo al número de estructuras de la tipología.

En la figura 38 se muestra el flujograma del código de matlab con extensión a Opensees. En este se indica la secuencia del proceso para obtener la capacidad estructural promedio de las edificaciones correspondientes a una tipología estructural. El proceso se repite para las tipologías restantes.

3.6. Espectros de demanda sísmica.

Los espectros de demanda se obtienen mediante el procedimiento establecido en la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC, 2015). Se elaboran espectros de demanda para un periodo de retorno de 475 años (espectros de diseño) y valores de factor de zona sísmica Z para la zona de estudio dados en el estudio de microzonificación de la ciudad de Loja (Castillo, 2013) comprendidos entre el rango de 0.22 hasta 0.27, además se incorporan valores entre un rango de 0.15 hasta 0.50 a intervalos de 0.05 para poder elaborar curvas de vulnerabilidad, esto se debe a que al utilizar los valores dados en Castillo (2013) no es posible definir correctamente curvas de vulnerabilidad debido a la falta de puntos. De acuerdo al mismo estudio los valores de velocidad de las ondas de corte en la ciudad varían entre 350 a 800 m/s, adoptando un perfil de suelo tipo C que se refiere a suelos densos o roca blanda según la NEC (2015).

Los espectros de demanda así obtenidos están en formato Aceleración vs Periodo y siguiendo el procedimiento del método N2 se transforma a coordenadas Aceleración vs Desplazamiento, graficando en el eje de las ordenadas la aceleración espectral y en las abscisas el desplazamiento espectral.

El procedimiento resumido para elaborar el espectro de demanda sísmica en este formato, es el siguiente:

- Cálculo del espectro elástico de aceleraciones, S_a (ver apartado 2.12.2).
- Cálculo del espectro elástico de desplazamientos S_d aplicando la siguiente ecuación:

Ecuación 1
$$S_d = \frac{T^2 \cdot S_a}{4\pi^2}$$

Donde S_d y S_a son respectivamente el desplazamiento y la aceleración espectral de tipo elástica y T es el periodo de vibración.

- Elaboración del espectro elástico en coordenadas Aceleración-Desplazamiento.

El mapa de zonificación sísmica para diseño según la NEC 2015 da un valor de Z para la ciudad de Loja de 0.25 y un PGA (aceleración máxima en el suelo) de 0.33, basándose en el mapa de Castillo (2013) para la zona de estudio el valor de Z varía desde 0.22 hasta 0.27 y el PGA varía desde 0.25 hasta 0.4, observándose que los valores generales dados por la NEC son muy adecuados para esta zona.

3.7. Punto de desempeño.

En esta investigación se estima el punto de desempeño mediante el método N2, superponiendo el espectro de capacidad y demanda se obtiene el punto de intersección de los mismos, este punto representa el máximo desplazamiento que la estructura soporta dado el sismo de demanda. El análisis se lo hace por cada categoría, tomando como base el espectro de capacidad de la categoría y los espectros de demanda para los valores de factor de zona sísmica Z indicados en el apartado anterior. Para encontrar el punto de desempeño se debe reducir el espectro de demanda (coordenadas Aceleración-Desplazamiento) de acuerdo a la ductilidad de la categoría, con las siguientes ecuaciones:

$$\text{Ecuación 2} \quad u = \frac{S_{dm}}{S_{dy}}$$

$$\text{Ecuación 3} \quad S_{ai} = \frac{S_a}{u}$$

$$\text{Ecuación 4} \quad S_{di} = u \frac{T^2}{4\pi^2} S_a$$

Donde:

S_{ai} y S_{di} es la aceleración y desplazamiento espectral inelástico, S_{dm} y S_{dy} es el desplazamiento espectral máximo y en el punto de fluencia y u es la ductilidad.

3.8. Curvas de vulnerabilidad.

Con los puntos de desempeño obtenidos para cada categoría, se aplica el procedimiento establecido por la metodología DBELA para la obtención de curvas de vulnerabilidad; que representan la probabilidad de daño para diferentes estados límites en función de la intensidad sísmica. La metodología se basa en comparar para cada valor de PGA los desplazamientos límites de las estructuras para el estado de daño en estudio con el desplazamiento dado por el punto de desempeño, luego se realiza un análisis para determinar aquellos desplazamientos límites que superan o no el obtenido por el punto de desempeño, determinando una probabilidad de excedencia del estado de daño. Así se obtiene para cada PGA un punto que indica la probabilidad de excedencia del estado de daño, estos se ajustan mediante una función de distribución dando como resultado una curva de vulnerabilidad. Este proceso se repite para los restantes estados de daño obteniéndose las curvas de vulnerabilidad de la categoría. En la figura 39 se muestra un flujograma de la metodología utilizada para la obtención de curvas de vulnerabilidad. En este se indica el procedimiento para obtener una curva de vulnerabilidad para cada estado límite de daño, correspondiente a una tipología estructural. El proceso se repite para las tipologías restantes.

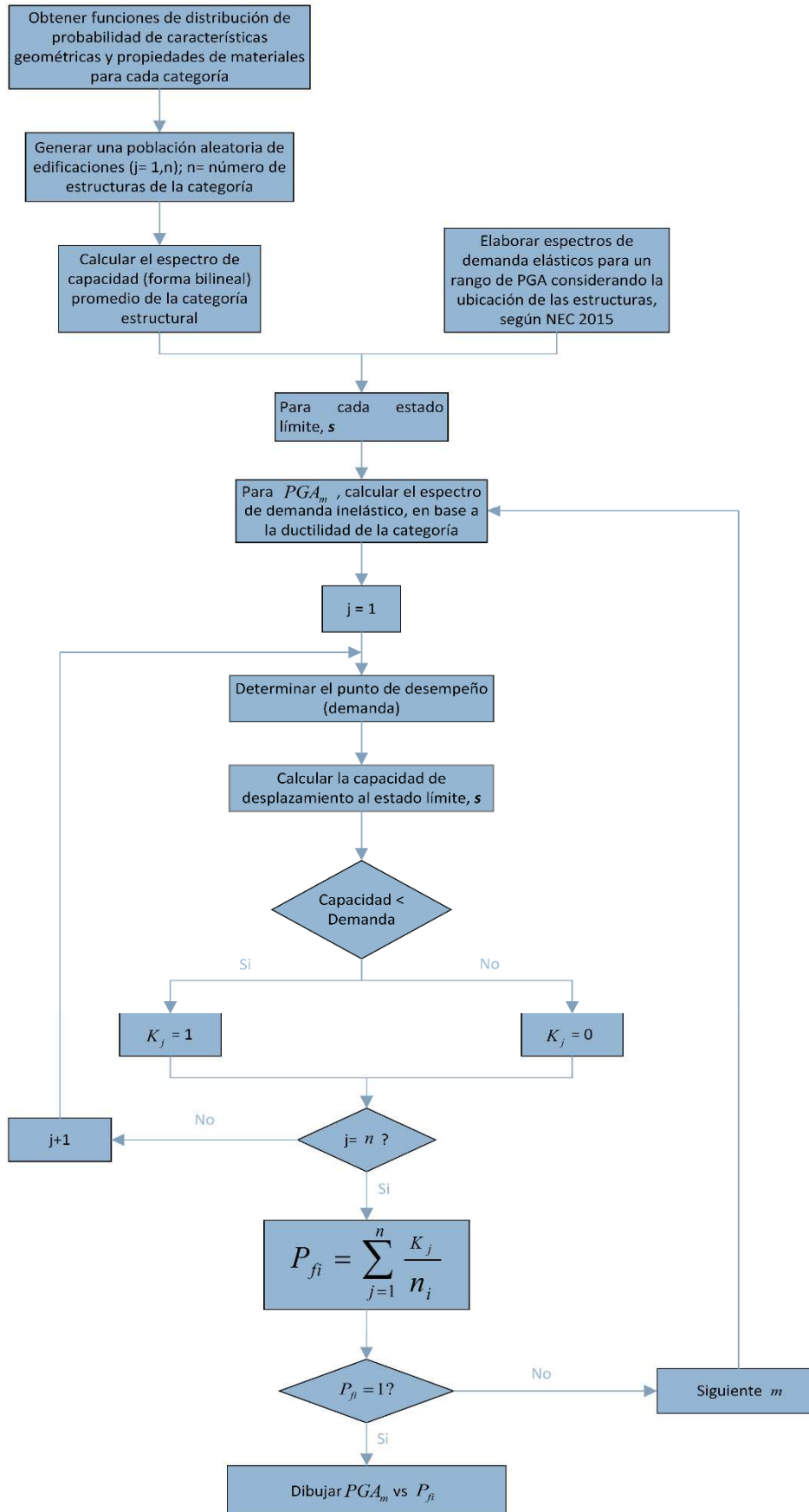


Figura 39. Flujograma de la metodología para la obtención de curvas de vulnerabilidad
Fuente y Elaboración: El autor

3.9. Mapas de riesgo sísmico.

Se determinan los valores de PGA para cada edificación de acuerdo al mapa de microzonificación sísmica de la ciudad de Loja (Castillo, 2013), con estos valores y de acuerdo al tipo de edificación se lee la probabilidad de daño para cada estado límite en las curvas de vulnerabilidad correspondientes.

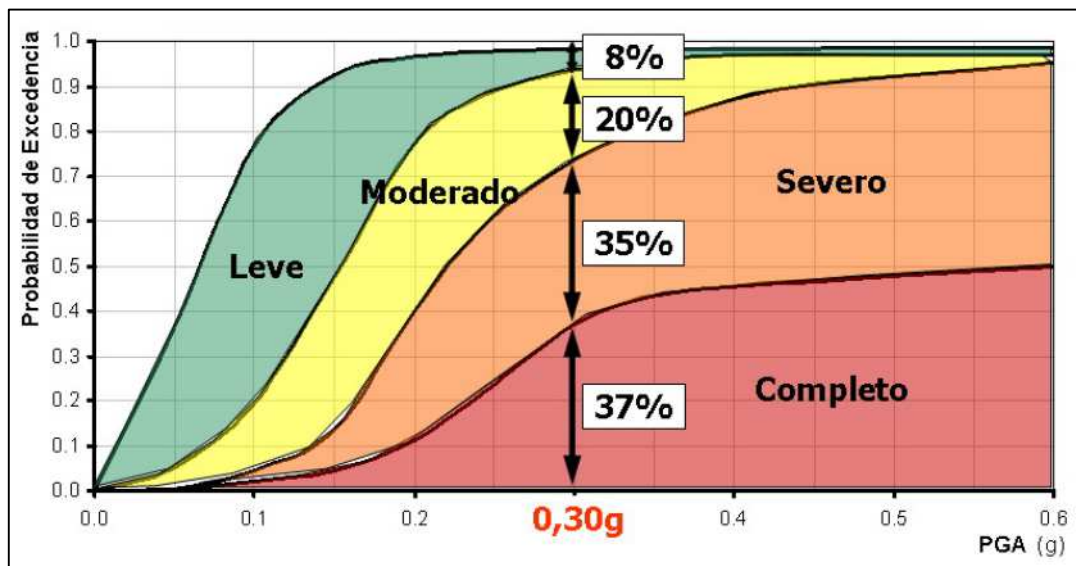


Figura 40. Ejemplo de lectura de probabilidades de daño
Fuente: (Velásquez, 2006)

En la figura 40 se muestra un ejemplo de lectura de probabilidades de daño para diferentes estados límites, en el cuál para una aceleración en el terreno de 0.30 (g) se obtiene una probabilidad de daño completo igual a 37%, de daño severo igual a 35%, de daño moderado igual a 20% y de daño leve igual a 8%.

Basándose en la posición georreferenciada se grafican los resultados obtenidos asistidos por un Sistema de Información Geográfica (SIG) generando mapas de riesgo sísmico de la zona de estudio para diferentes estados de daño.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Introducción.

Aplicando la metodología descrita en el capítulo 3 se obtiene para cada categoría estructural los siguientes resultados:

- Espectro de capacidad bilineal promedio.
- Espectros inelásticos de diseño.
- Puntos de desempeño.
- Curvas de vulnerabilidad.
- Mapas de riesgo sísmico.

Para la correcta interpretación de los resultados, debe tenerse en cuenta que la presente estimación se refiere a edificios aporricados de hormigón armado. Por lo tanto, los resultados obtenidos deben tenerse en cuenta dentro de este sistema estructural y no dentro del total de edificaciones de la zona en estudio.

4.2. Espectros de capacidad bilineal.

La capacidad estructural de las edificaciones se obtiene a través de un análisis estático no lineal “pushover” (basado en fibras). La curva de capacidad obtenida se transforma a coordenadas Aceleración-Desplazamiento, luego se representa bilinealmente con un criterio de balance de energía, ver apartado 2.11.

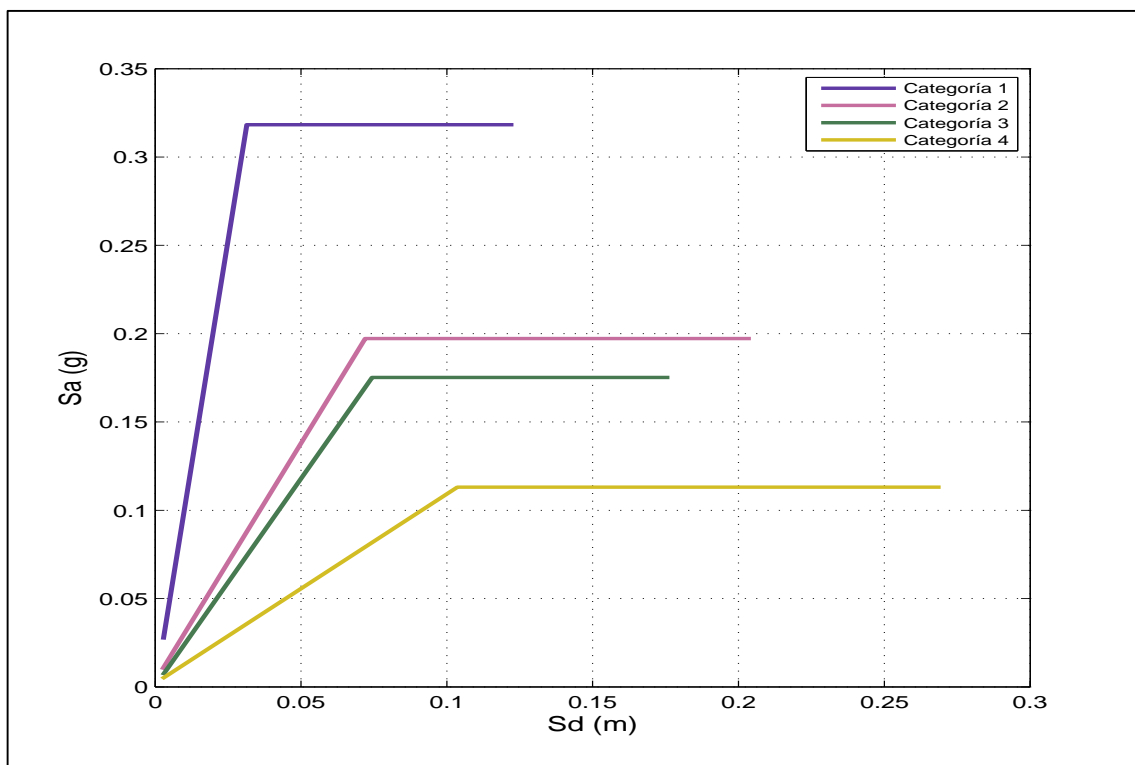


Figura 41. Espectros de capacidad bilineal promedio de las tipologías analizadas
Fuente y Elaboración: El autor

La tabla 6 muestra el desplazamiento de cedencia (D_y), el desplazamiento último (D_u) y la aceleración espectral (S_a), puntos que definen la representación bilineal de estos espectros, así como también la ductilidad (u); para cada categoría estructural.

Tabla 6. Parámetros de la representación bilineal del espectro de capacidad promedio y ductilidad.

| Tipología | D_y (m) | S_a (g) | D_u (m) | u |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|------|
| Categoría 1 | 0.031 | 0.339 | 0.123 | 3.91 |
| Categoría 2 | 0.072 | 0.198 | 0.203 | 2.83 |
| Categoría 3 | 0.075 | 0.175 | 0.176 | 2.37 |
| Categoría 4 | 0.102 | 0.111 | 0.274 | 2.69 |

Fuente y elaboración: El autor

En la tabla 6 y figura 41 se observa que la categoría 1 muestra la mayor rigidez al presentar en el espectro de capacidad la mayor pendiente en el rango elástico además también presenta la mayor ductilidad $u = 3.91$. La categoría 3 presenta la menor ductilidad $u = 2.37$, por otro lado la categoría 4 muestra la menor rigidez al presentar la menor pendiente en el rango elástico del espectro de capacidad. La aceleración espectral al igual que la ductilidad muestra la mayor diferencia entre la categoría 1 y 2 disminuyendo 0.141 (g) y 1.08 respectivamente, mientras que el desplazamiento espectral último muestra la mayor diferencia entre la categoría 3 y 4 aumentando 0.098 (m). El valor máximo de aceleración espectral así como la rigidez disminuye a medida que aumenta la altura de la edificación (categoría) mientras que el desplazamiento último generalmente aumenta.

Parte de la energía introducida por el sismo es absorbida de forma elástica, mientras que la otra es disipada gracias a la ductilidad, considerando este criterio la categoría 1 presentará el mejor comportamiento ante acciones sísmicas.

En las figuras 42, 44, 46 y 48 se muestran los espectros de capacidad bilineal de las estructuras modeladas dentro de cada tipología estructural, así como también el espectro promedio; correspondiente a las categorías 1, 2, 3 y 4 respectivamente, estos resultados se obtienen de acuerdo al procedimiento indicado en el apartado 3.5.3. Además, se muestra el número de modelaciones obtenidas por cada tipología estructural de acuerdo al apartado 3.5.2.

En las figuras 43, 45, 47 y 49 se muestra el espectro de capacidad promedio y los desplazamientos a partir de los cuáles se inicia cada estado de daño, así como también el desplazamiento de cedencia (D_y) y el desplazamiento último (D_u); correspondientes a la categoría 1, 2, 3 y 4 respectivamente. Los estados de daño se representan de acuerdo al apartado 2.15.

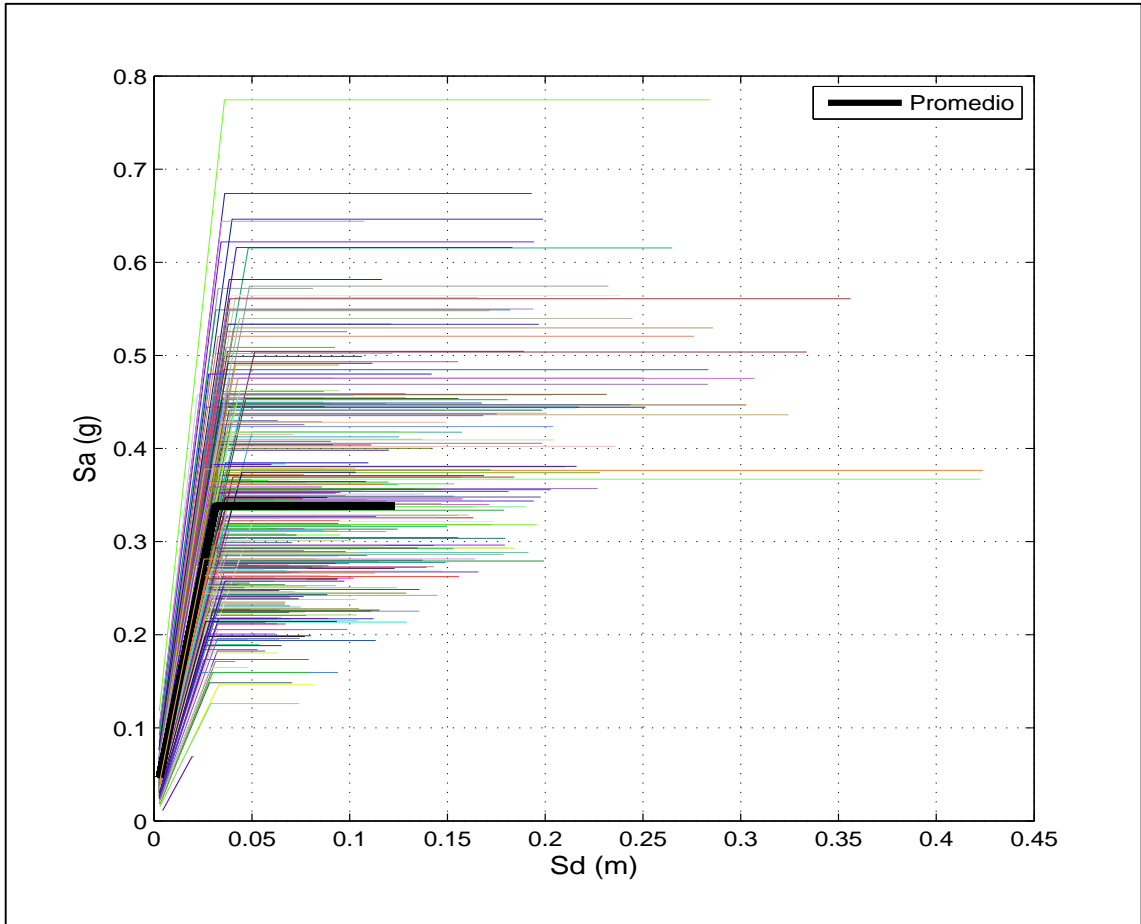


Figura 42. Espectros de capacidad bilineal correspondientes a 432 edificaciones - **Categoría 1**
Fuente y Elaboración: El autor

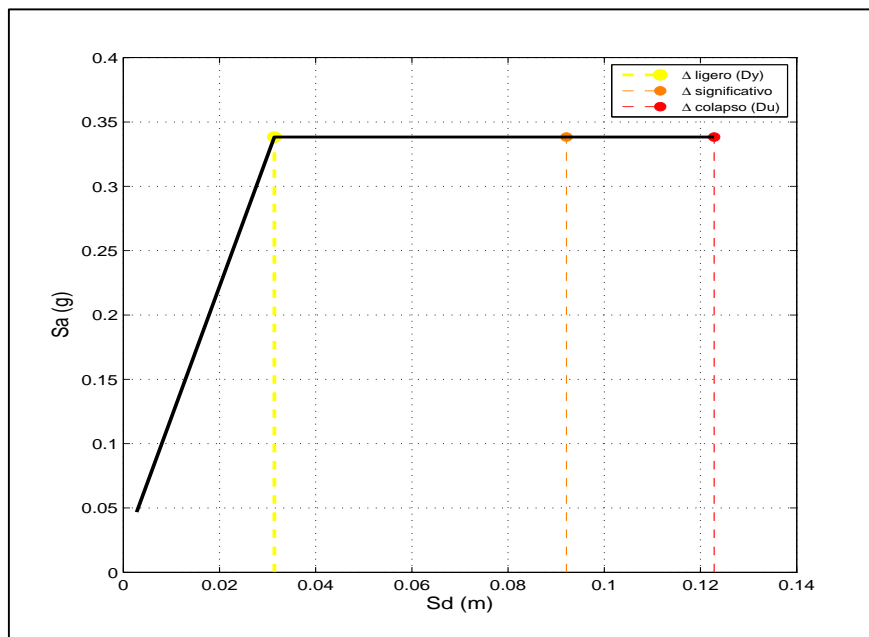


Figura 43. Espectro de capacidad bilineal promedio y desplazamientos a partir de los cuáles se inicia cada estado de daño - **Categoría 1**
Fuente y Elaboración: El autor

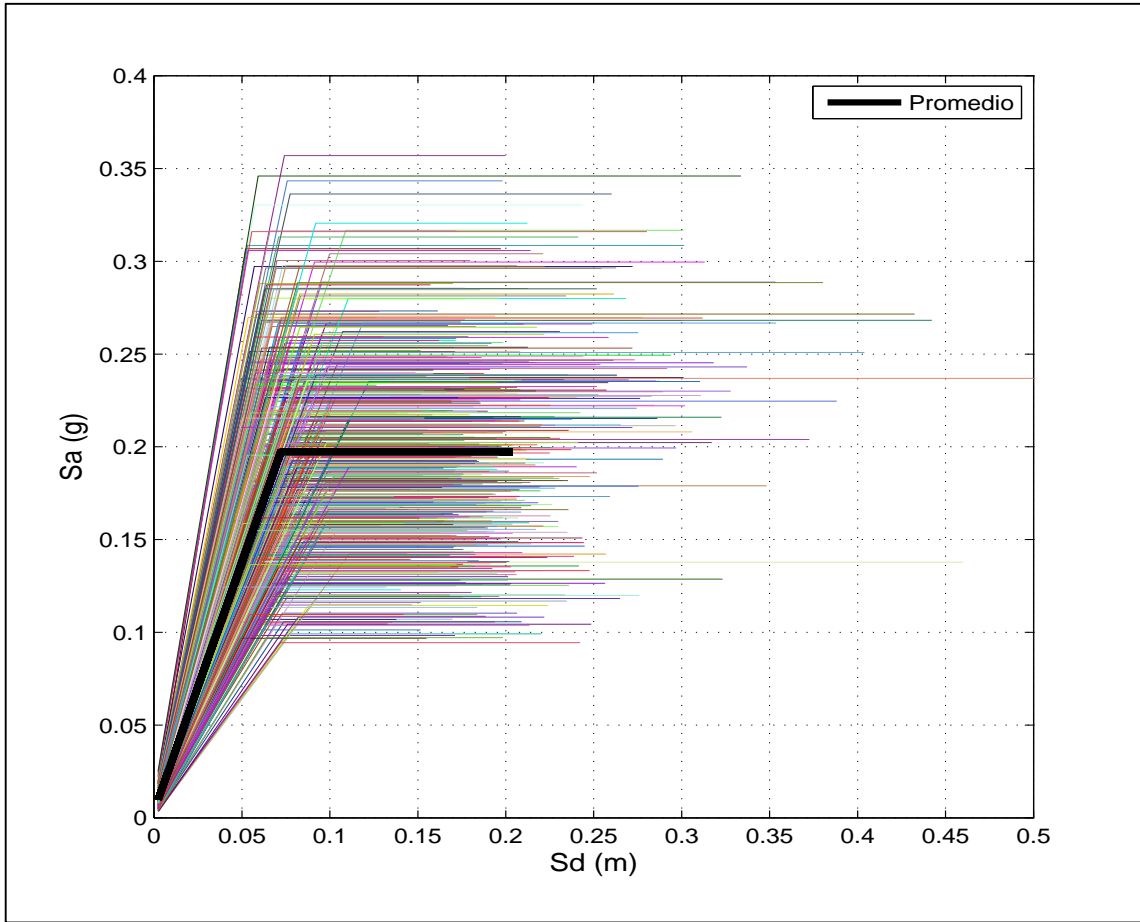


Figura 44. Espectros de capacidad bilineal correspondientes a 504 edificaciones – **Categoría 2**
Fuente y Elaboración: El autor

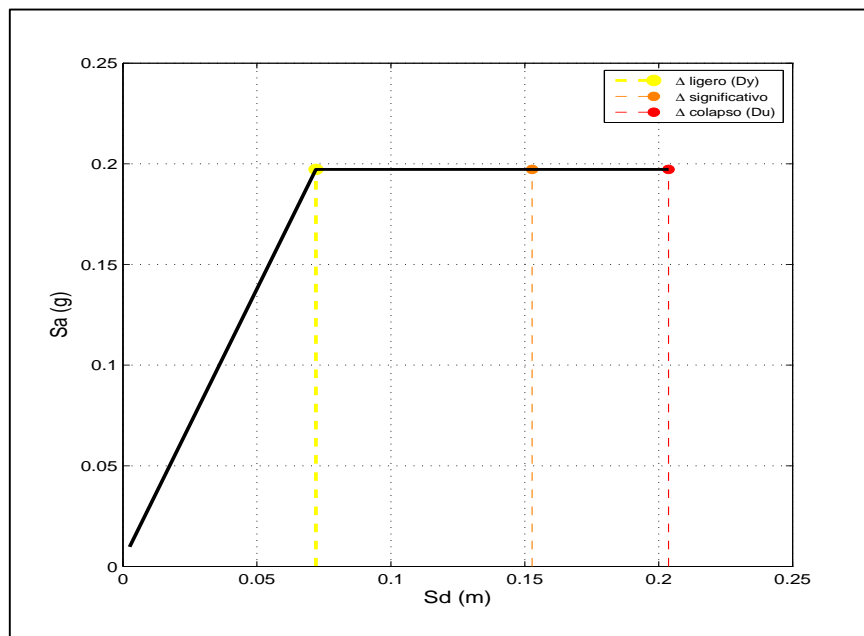


Figura 45. Espectro de capacidad bilineal promedio y desplazamientos a partir de los cuáles se inicia cada estado de daño - **Categoría2**
Fuente y Elaboración: El autor

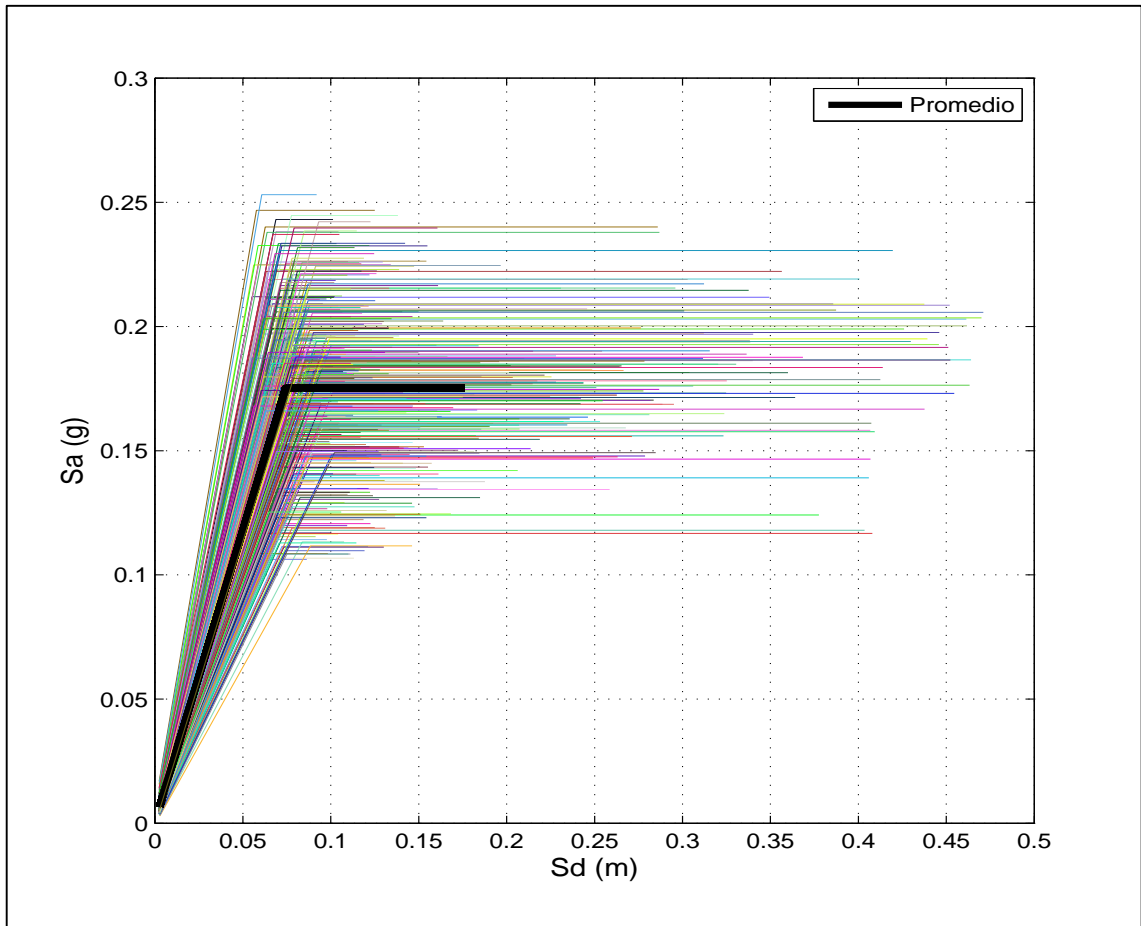


Figura 46. Espectros de capacidad bilineal correspondientes a 385 edificaciones – **Categoría 3**
Fuente y Elaboración: El autor

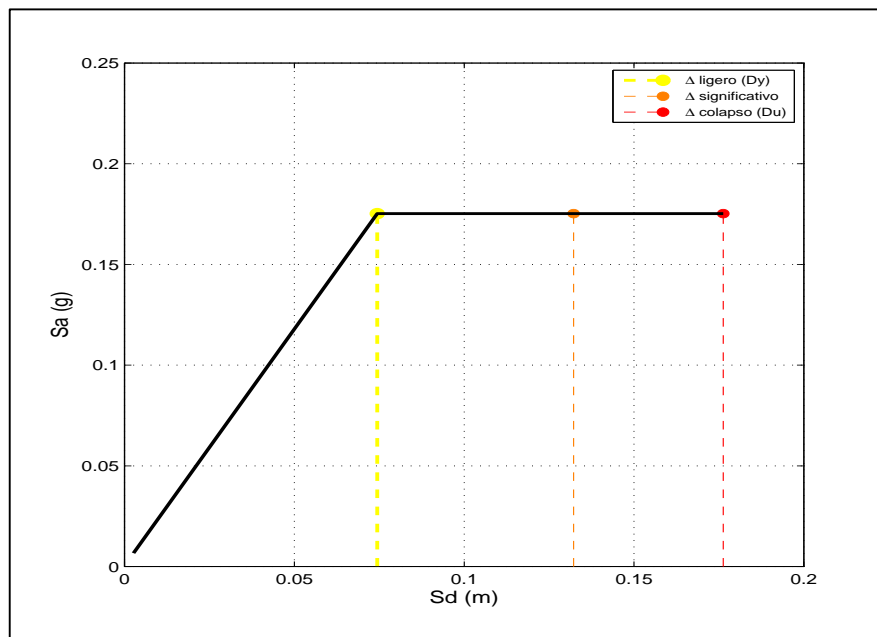


Figura 47. Espectro de capacidad promedio y desplazamientos a partir de los cuáles se inicia cada estado de daño – **Categoría 3**
Fuente y Elaboración: El autor

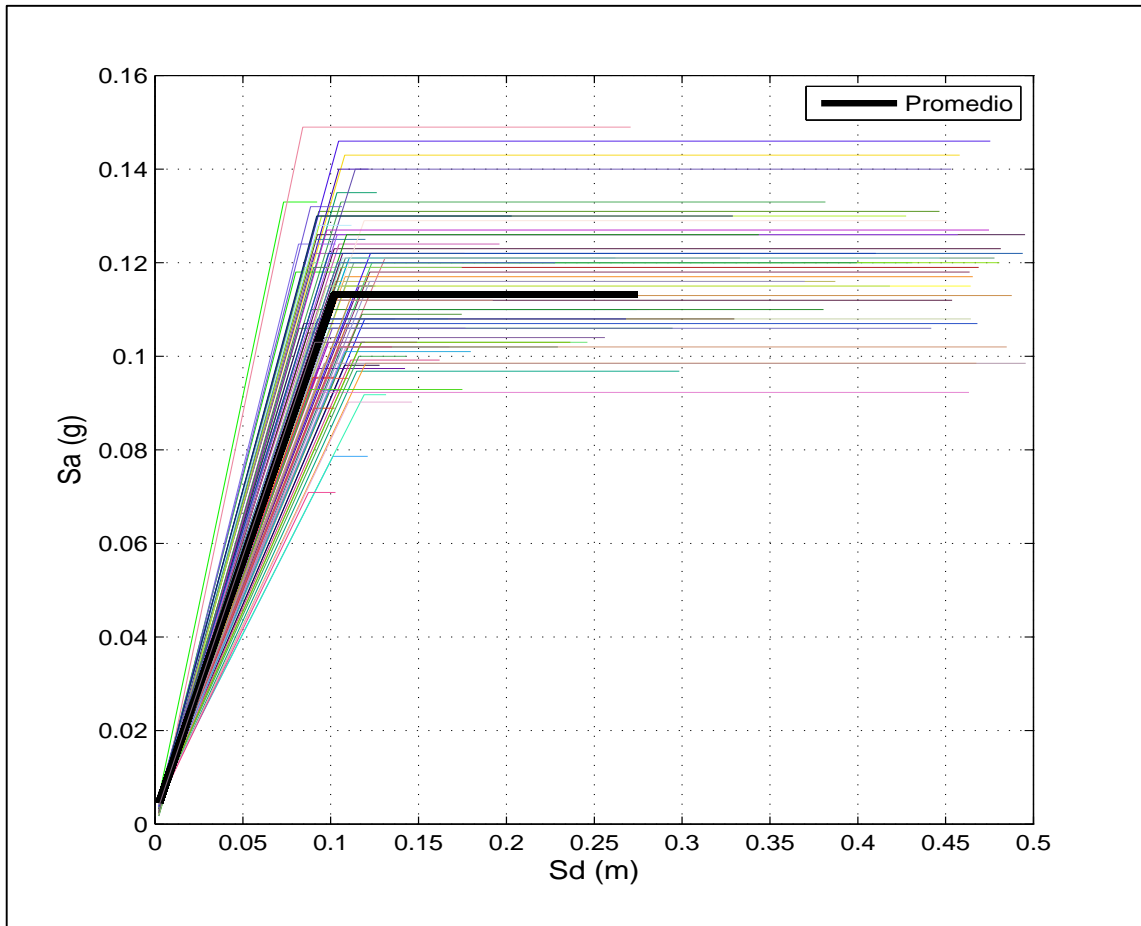


Figura 48. Espectros de capacidad bilineal correspondientes a 198 edificaciones – **Categoría 4**
Fuente y Elaboración: El autor

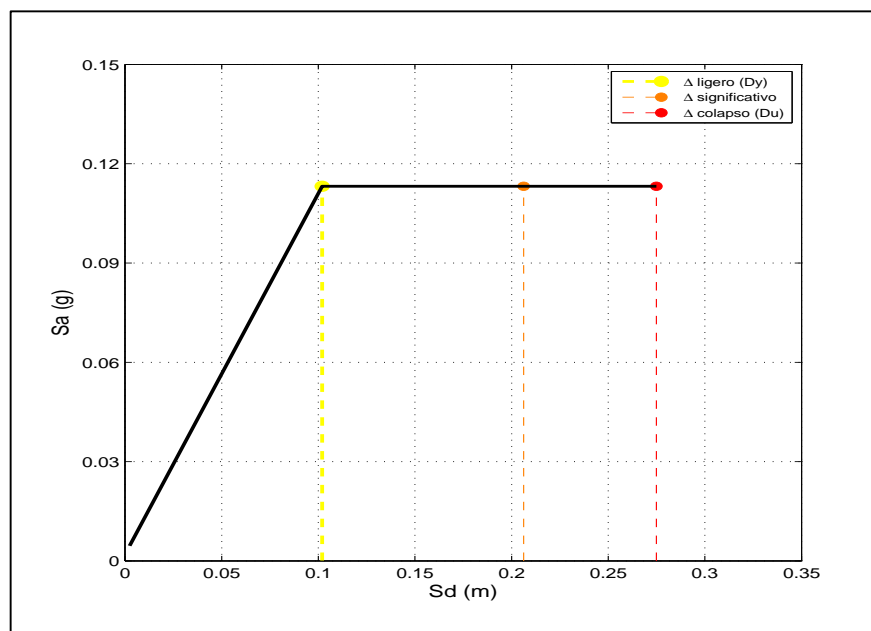


Figura 49. Espectro de capacidad promedio y desplazamientos a partir de los cuáles se inicia cada estado de daño - **Categoría 4**
Fuente y Elaboración: El autor

En la tabla 7 se muestra el periodo de vibración y el factor de participación modal medio de las categorías analizadas.

Tabla 7. Parámetros modales de las categorías analizadas.

| Tipología | T (seg) | PF |
|--------------------|---------|-------|
| Categoría 1 | 0.398 | 1 |
| Categoría 2 | 0.595 | 1.202 |
| Categoría 3 | 0.612 | 1.254 |
| Categoría 4 | 0.669 | 1.283 |

Fuente y elaboración: El autor

Los periodos de vibración son menores a un segundo cumpliendo con la hipótesis del análisis “pushover”, según la cual el modo fundamental de vibración corresponde a la respuesta predominante generalmente válido para estructuras con periodos menores a un segundo. El factor de participación modal representa la relación entre el desplazamiento sísmico que ocurre a nivel de techo de un sistema de múltiples grados de libertad y el desplazamiento espectral que experimenta bajo el mismo sismo un sistema equivalente de un grado de libertad, razón por la cual la categoría 1 al tener un solo piso de altura obtiene únicamente un grado de libertad, por lo tanto el factor de participación modal es uno.

En la tabla 8 se muestra el desplazamiento en el techo espectral (modal) y real (nodal) para cada categoría estructural, a partir de los cuáles se inicia cada estado de daño. La diferencia entre estos es mínima, resultados que ratifican el uso del análisis pushover en la investigación.

Tabla 8. Desplazamiento espectral y real para cada estado de daño y cada categoría

| Tipología | Daño ligero (m) | | Daño significativo (m) | | Colapso (m) | |
|--------------------|-----------------|-------|------------------------|-------|-------------|-------|
| | Modal | Real | Modal | Real | Modal | Real |
| Categoría 1 | 0.031 | 0.031 | 0.092 | 0.092 | 0.123 | 0.123 |
| Categoría 2 | 0.072 | 0.087 | 0.152 | 0.183 | 0.203 | 0.244 |
| Categoría 3 | 0.075 | 0.094 | 0.132 | 0.166 | 0.176 | 0.221 |
| Categoría 4 | 0.102 | 0.131 | 0.206 | 0.264 | 0.274 | 0.352 |

Fuente y elaboración: El autor

4.3. Espectros de demanda.

La demanda sísmica se obtiene mediante la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC, 2015). De acuerdo al apartado 2.12.2 y con los datos presentados en la tabla 9, se elaboran espectros de diseño en formato Aceleración vs Periodo para valores de factor de zona sísmica Z indicados y justificados en el apartado 3.6. Luego, siguiendo el procedimiento descrito en el mismo apartado se transforma a coordenadas Aceleración vs Desplazamiento, con el propósito de superponer la capacidad estructural y la demanda sísmica en el mismo diagrama.

Tabla 9. Coeficientes utilizados para generar espectros de diseño según NEC (2015), en función de Z y el tipo de suelo.

| Z | Fa | Fd | Fs | n | r |
|------|------|-------|-------|------|---|
| 0.15 | 1.40 | 1.360 | 0.850 | 2.48 | 1 |
| 0.22 | 1.33 | 1.304 | 0.913 | 2.48 | 1 |
| 0.23 | 1.32 | 1.296 | 0.922 | 2.48 | 1 |
| 0.24 | 1.31 | 1.288 | 0.931 | 2.48 | 1 |
| 0.25 | 1.30 | 1.280 | 0.940 | 2.48 | 1 |
| 0.26 | 1.29 | 1.262 | 0.956 | 2.48 | 1 |
| 0.27 | 1.28 | 1.244 | 0.972 | 2.48 | 1 |
| 0.30 | 1.25 | 1.190 | 1.020 | 2.48 | 1 |
| 0.35 | 1.23 | 1.150 | 1.060 | 2.48 | 1 |
| 0.40 | 1.20 | 1.110 | 1.110 | 2.48 | 1 |
| 0.50 | 1.18 | 1.060 | 1.230 | 2.48 | 1 |

Fuente y elaboración: El autor

La figura 50 muestra los espectros obtenidos en coordenadas Aceleración - Desplazamiento.

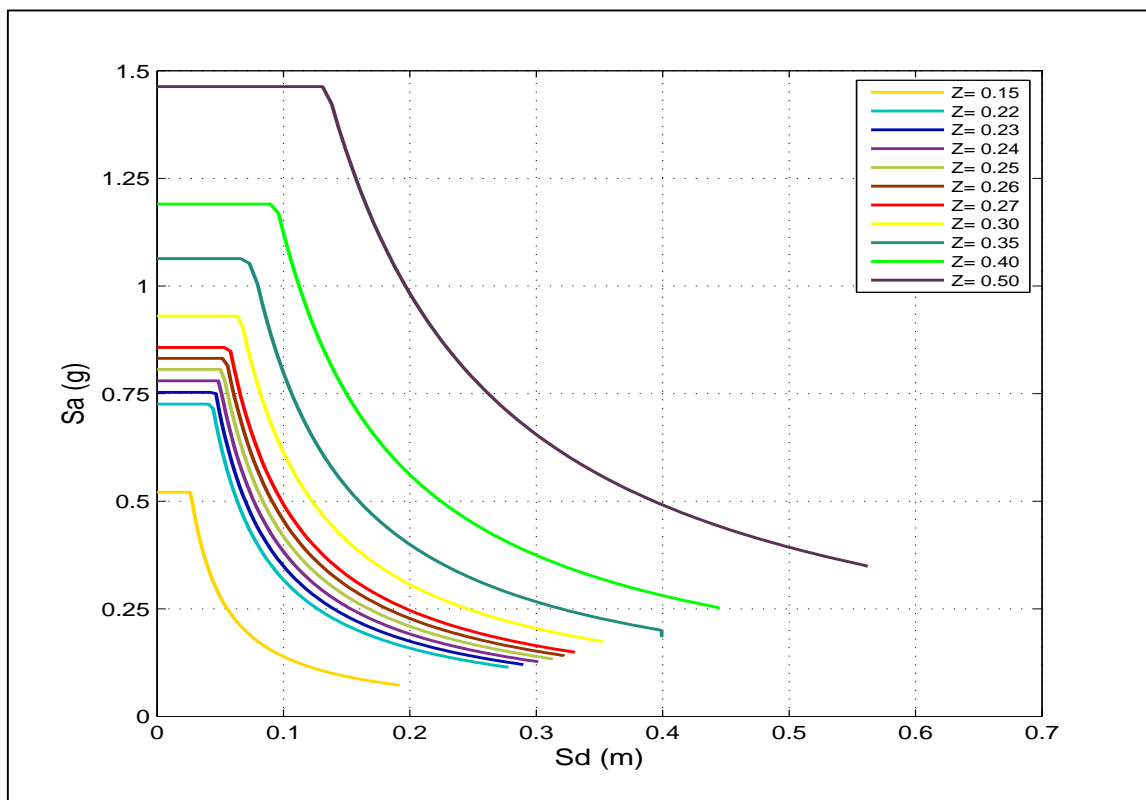


Figura 50. Espectros elásticos de diseño para diferentes valores de factores de zona sísmica Z
Fuente y Elaboración: El autor

En las figuras 51 a 54 se presentan los espectros inelásticos para las diferentes categorías estructurales. Estos se obtienen al reducir los espectros elásticos en función de la ductilidad (ver tabla 6) de cada categoría, de acuerdo a las ecuaciones mostradas en el apartado 3.7; estas corresponden al método N2.

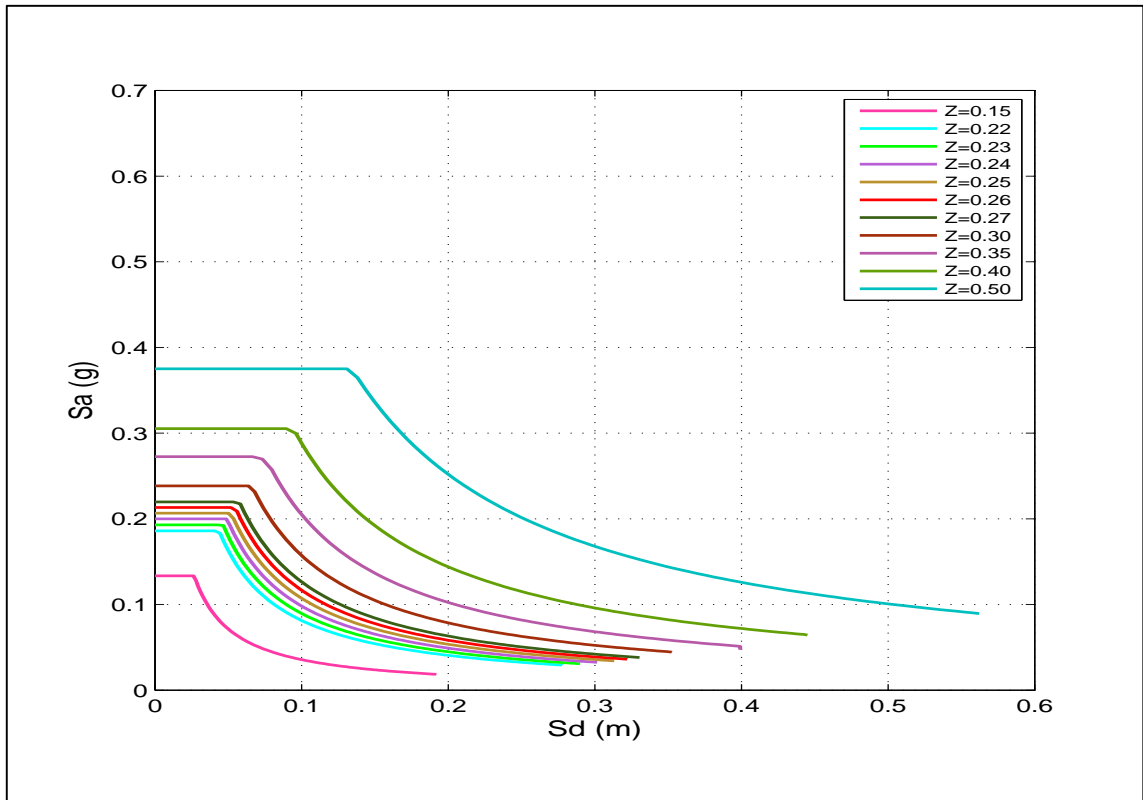


Figura 51. Espectros inelásticos de diseño – Categoría 1

Fuente y Elaboración: El autor

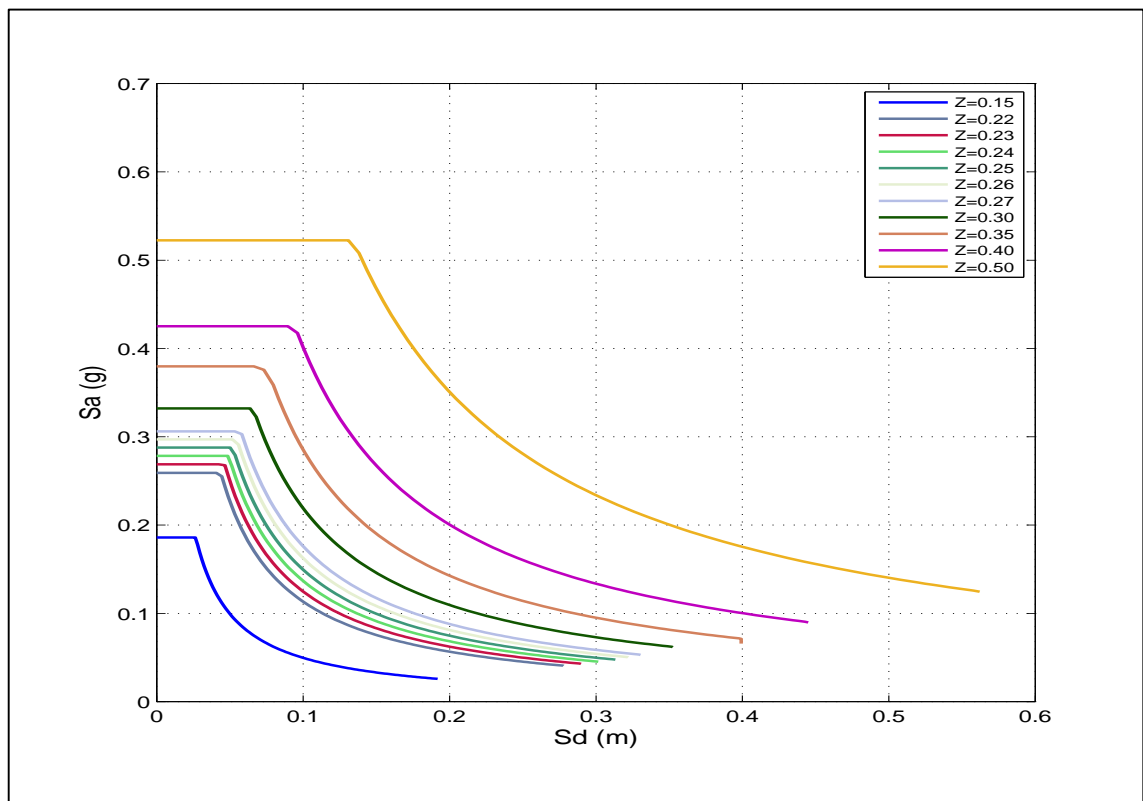


Figura 52. Espectros inelásticos de diseño – Categoría 2

Fuente y Elaboración: El autor

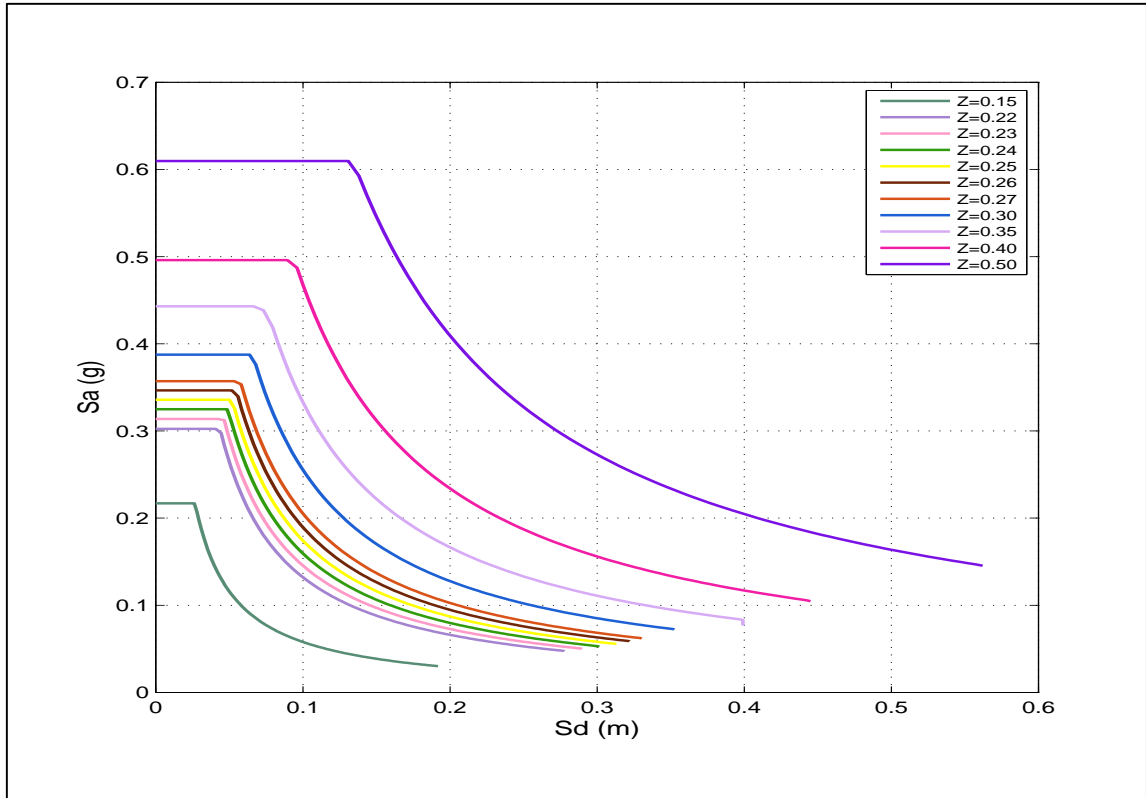


Figura 53. Espectros inelásticos de diseño – **Categoría 3**

Fuente y Elaboración: El autor

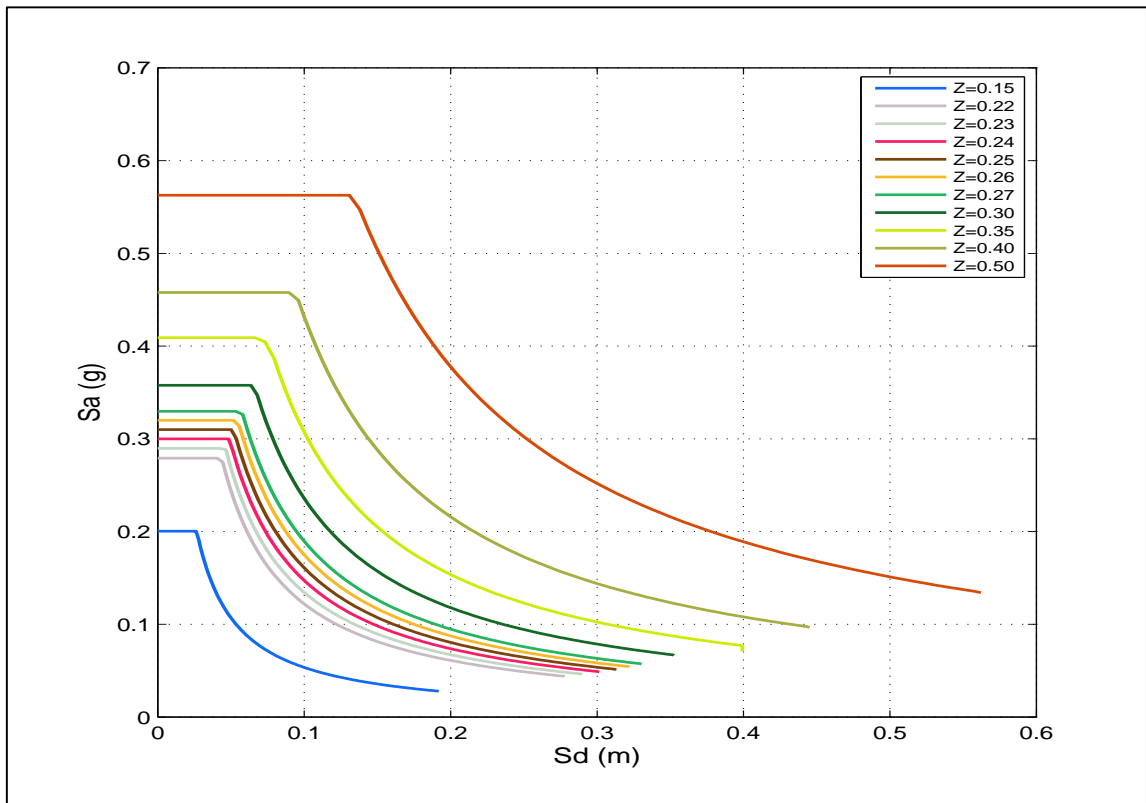


Figura 54. Espectros inelásticos de diseño – **Categoría 4**

Fuente y Elaboración: El autor

La categoría estructural 1 al presentar el mayor valor de ductilidad (3.91) muestra los espectros inelásticos de menor demanda sísmica, mientras que, la categoría estructural 3 al presentar el menor valor de ductilidad (2.37) muestra los espectros inelásticos de mayor demanda sísmica.

4.4. Puntos de desempeño.

El comportamiento sísmico de un edificio sometido a un terremoto se puede cuantificar mediante su respuesta máxima de desplazamiento que se determina mediante el punto de desempeño.

Las figuras 55 a 58 muestran la representación gráfica de los puntos de desempeño de las categorías estructurales estudiadas. Estos puntos se obtienen utilizando el método N2 indicado en el apartado 3.6 y corresponden a la intersección del espectro de capacidad promedio con los espectros inelásticos de demanda. Como es de esperarse la demanda de desplazamiento aumenta con la altura del edificio y con el incremento del factor de zona sísmica Z.

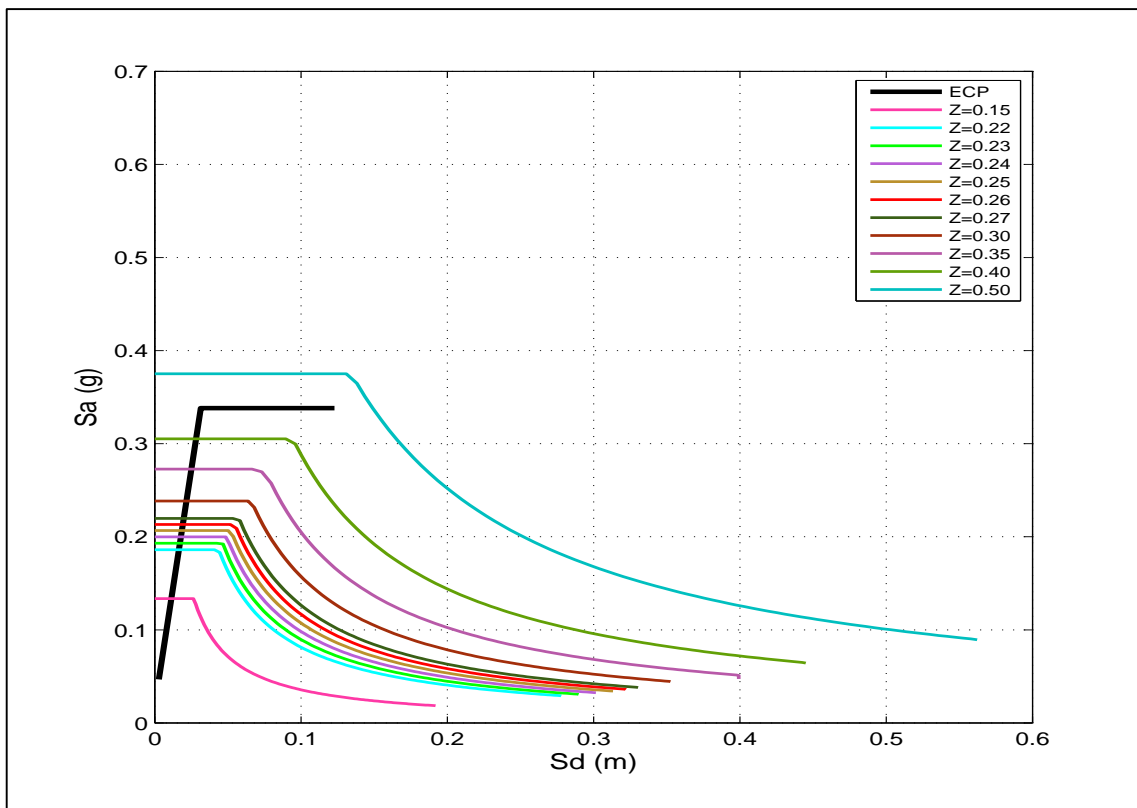


Figura 55. Puntos de desempeño, en función del espectro de capacidad promedio y los espectros inelásticos de diseño – **Categoría 1**

Fuente y Elaboración: El autor

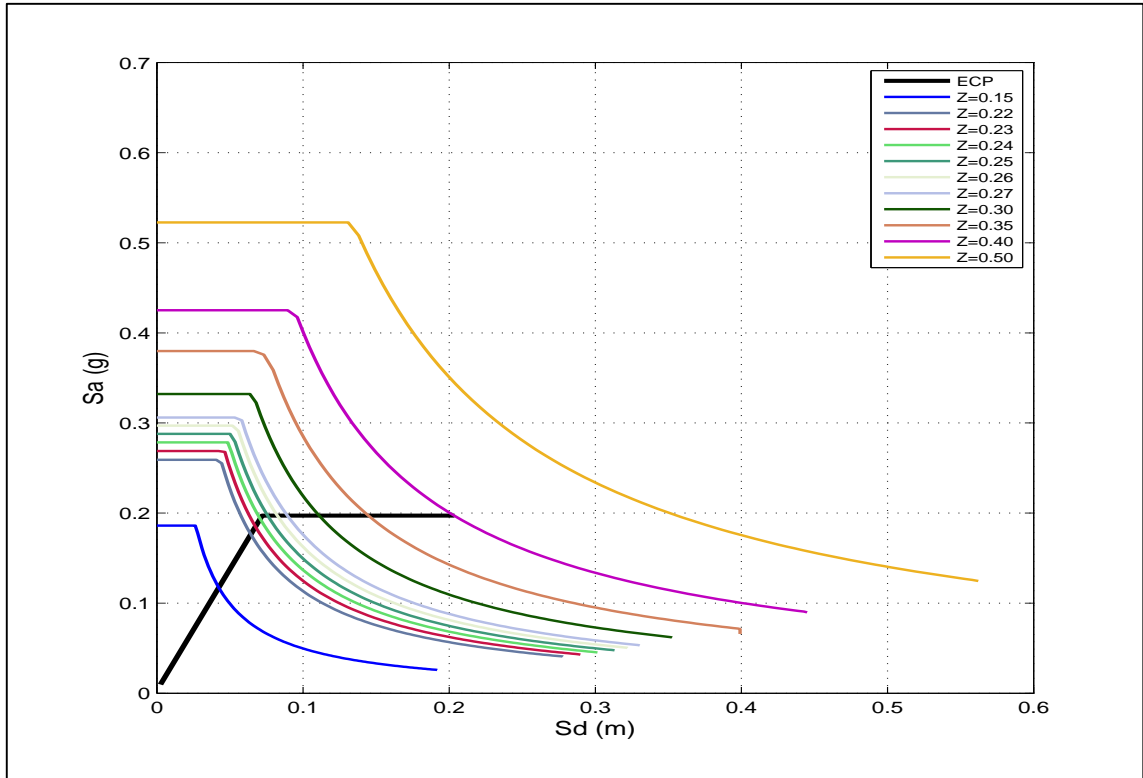


Figura 56. Puntos de desempeño, en función del espectro de capacidad promedio y los espectros inelásticos de diseño – **Categoría 2**
Fuente y Elaboración: El autor

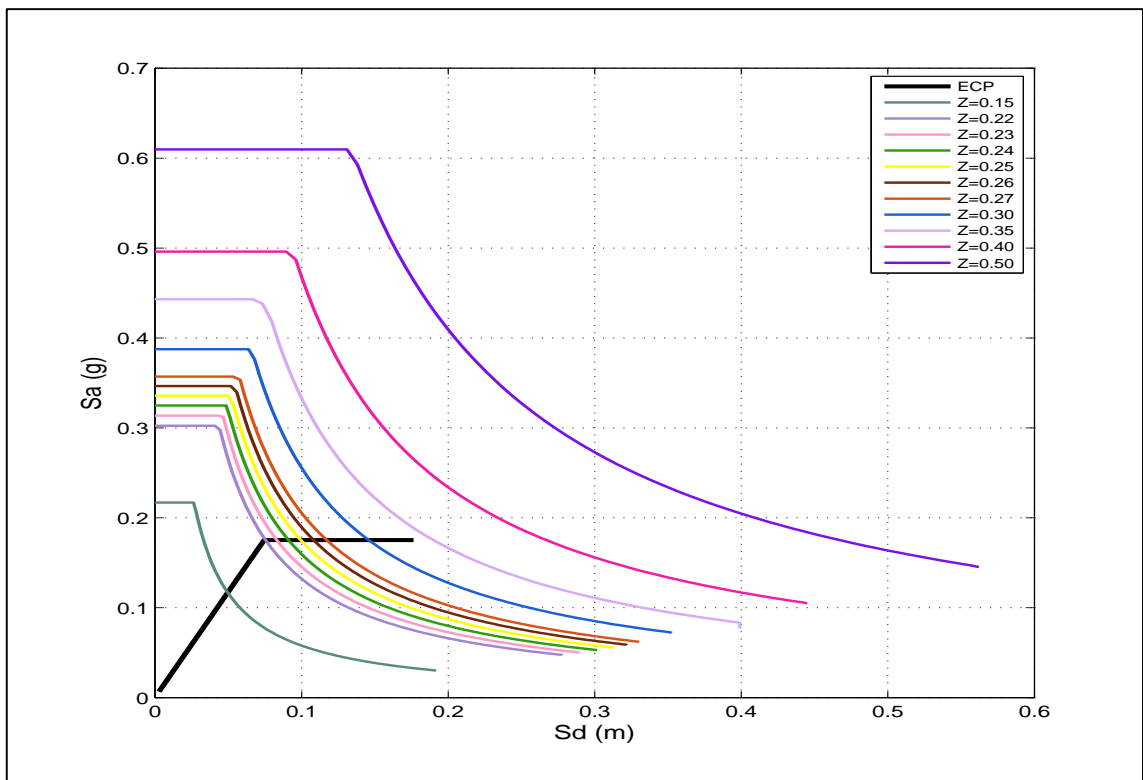


Figura 57. Puntos de desempeño, en función del espectro de capacidad promedio y los espectros inelásticos de diseño – **Categoría 3**
Fuente y Elaboración: El autor

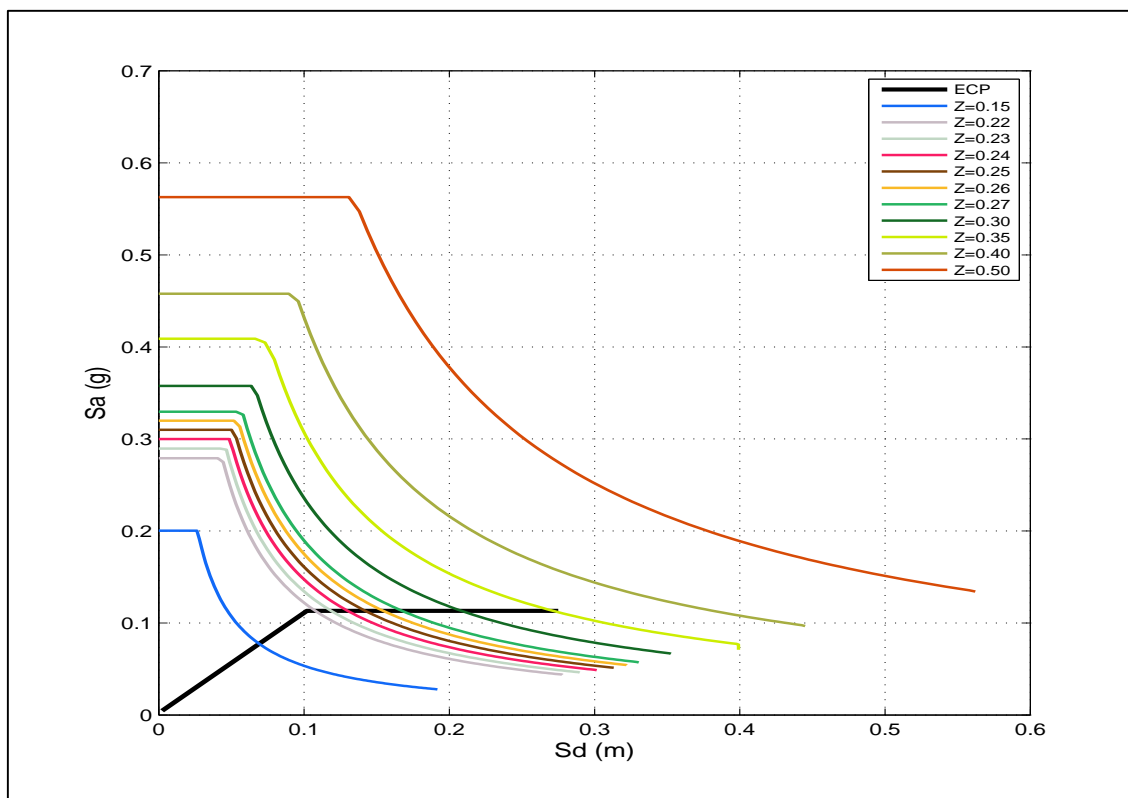


Figura 58. Puntos de desempeño, en función del espectro de capacidad promedio y los espectros inelásticos de diseño – **Categoría 4**

Fuente y Elaboración: El autor

La tabla 10 resume los valores de demanda de desplazamiento espectral de las cuatro tipologías, para los espectros de diseño de la normativa ecuatoriana NEC 2015.

Tabla 10. Puntos de desempeño para cada categoría y cada factor Z.

| Z | Categoría 1 Sd (m) | Categoría 2 Sd (m) | Categoría 3 Sd (m) | Categoría 4 Sd (m) |
|-------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 0.15 | 0.013 | 0.041 | 0.051 | 0.070 |
| 0.22 | 0.018 | 0.064 | 0.077 | 0.107 |
| 0.23 | 0.0185 | 0.067 | 0.084 | 0.118 |
| 0.24 | 0.019 | 0.071 | 0.093 | 0.131 |
| 0.25 | 0.020 | 0.075 | 0.101 | 0.142 |
| 0.26 | 0.0205 | 0.082 | 0.110 | 0.153 |
| 0.27 | 0.021 | 0.089 | 0.119 | 0.167 |
| 0.30 | 0.023 | 0.111 | 0.147 | 0.208 |
| 0.35 | 0.026 | 0.152 | 0.202 | 0.284 |
| 0.40 | 0.029 | 0.203 | 0.272 | 0.286 |
| 0.50 | 0.167 | 0.348 | 0.470 | 0.589 |

Fuente y Elaboración: El autor

En las figuras 55 a 58 se observa el desempeño estructural de las tipologías estructurales ante la ocurrencia del sismo de diseño. Basándose en los valores de Z dados en Castillo (2013); la categoría 1 está dentro del rango elástico, la categoría 2 puede llegar a fluencia y las categorías 3 y 4 se encuentran en el rango plástico.

4.5. Curvas de vulnerabilidad.

Estas describen la probabilidad de exceder un cierto estado límite de daño en función de un estimador de la acción sísmica (Borzi et al., 2008). Con los puntos de desempeño obtenidos para cada categoría se aplica el procedimiento establecido por la metodología DBELA para la obtención de curvas de vulnerabilidad (ver apartado 3.8).

Las figuras 59 a 62 muestran las curvas de vulnerabilidad para cada categoría estructural. Para una mejor interpretación de los resultados obtenidos en las curvas de vulnerabilidad se elaboran matrices de probabilidad de daño para valores representativos de PGA en la zona de estudio, ver las tablas 11 a 14.

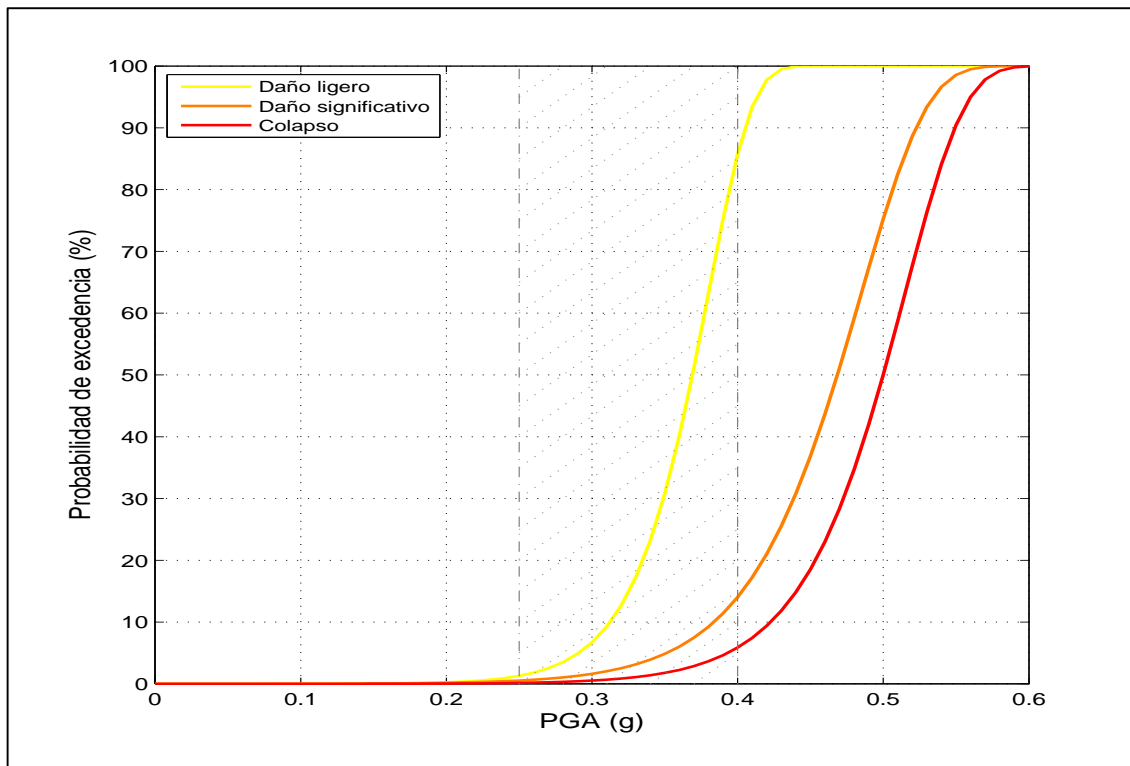


Figura 59. Curvas de vulnerabilidad para tres estados límites – Categoría 1

Fuente y Elaboración: El autor

Tabla 11. Matriz de probabilidad de daño – Categoría 1

| Valores de probabilidad de daño (%) | | | | |
|-------------------------------------|----------------------------|--------|---------------|---------|
| PGA (g) | Estado de daño estructural | | | |
| | Sin daño | Ligero | Significativo | Colapso |
| 0.25 | 99 | 1 | 0 | 0 |
| 0.30 | 92 | 7 | 1 | 0 |
| 0.35 | 67 | 27 | 4 | 2 |
| 0.40 | 16 | 71 | 7 | 6 |

Fuente y Elaboración: El autor

En la figura 59 se observa que el PGA (g) de colapso correspondiente a esta categoría es 0.6. Basándose en la tabla 11; para valores de PGA (g) igual a 0.25, 0.30, 0.35 se obtiene mayor probabilidad de daño no estructural (99, 92 y 67% respectivamente) y para PGA (g) igual a 0.40 se obtiene mayor probabilidad de daño estructural ligero (71%). Al presentar los valores de probabilidad de daño más conservadores es la categoría menos vulnerable.

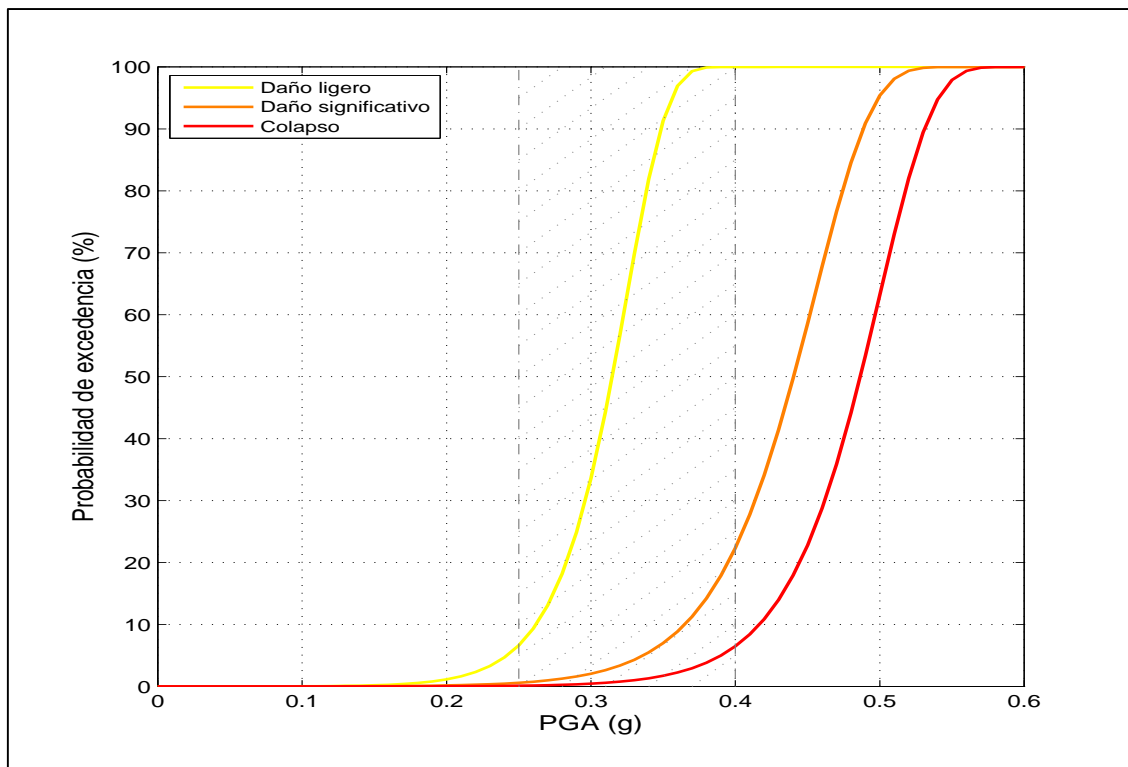


Figura 60. Curvas de vulnerabilidad para tres estados límites – **Categoría 2**
Fuente y Elaboración: El autor

Tabla 12. Matriz de probabilidad de daño – Categoría 2

| PGA (g) | Valores de probabilidad de daño (%) | | | |
|---------|-------------------------------------|--------|---------------|---------|
| | Sin daño | Ligero | Significativo | Colapso |
| 0.25 | 92 | 7 | 1 | 0 |
| 0.30 | 66 | 31 | 2 | 1 |
| 0.35 | 8 | 81 | 8 | 3 |
| 0.40 | 0 | 78 | 15 | 7 |

Fuente y Elaboración: El autor

En la figura 60 se observa que el PGA (g) de colapso correspondiente a esta categoría es 0.57, muy similar al valor obtenido para la categoría 1. Basándose en la tabla 12; para valores de PGA (g) igual a 0.25, 0.30 se obtiene mayor probabilidad de daño no estructural (92 y 66% respectivamente) y para valores igual a 0.30, 0.35 se obtiene mayor probabilidad de daño estructural ligero (81 y 78% respectivamente).

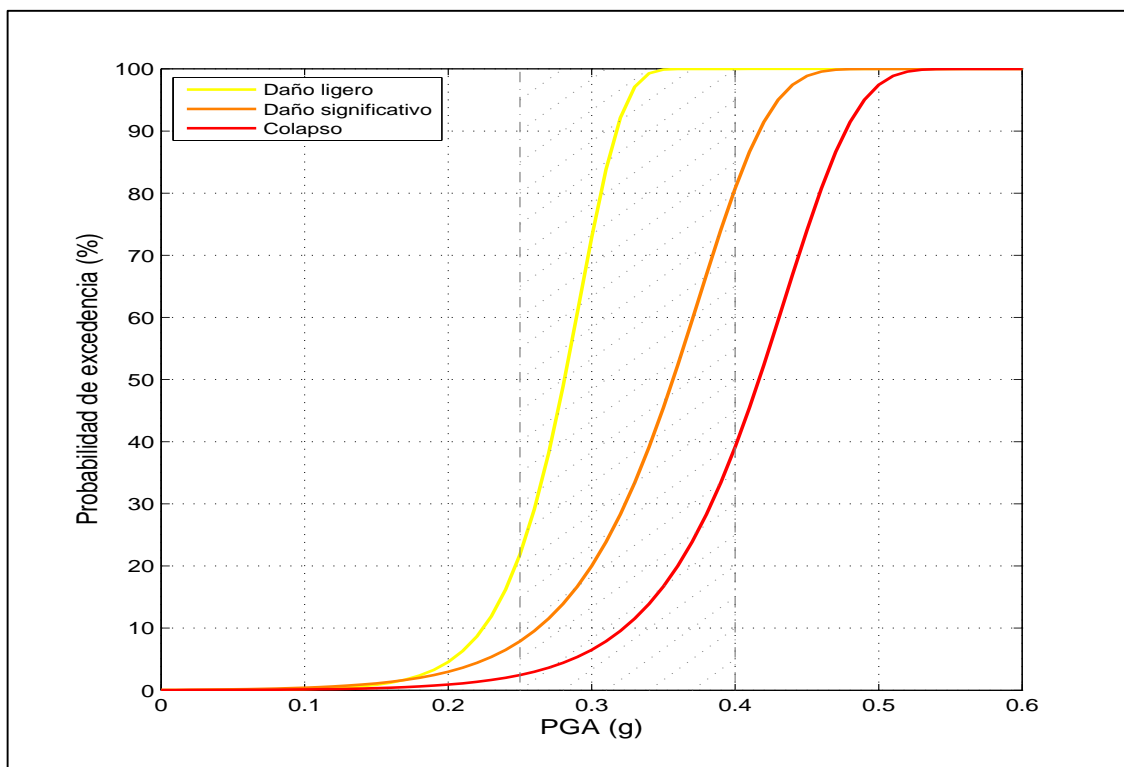


Figura 61. Curvas de vulnerabilidad para tres estados límites – **Categoría 3**
Fuente y Elaboración: El autor

Tabla 13. Matriz de probabilidad de daño – Categoría 3

| Valores de probabilidad de daño (%) | | | | |
|-------------------------------------|----------------------------|--------|---------------|---------|
| PGA (g) | Estado de daño estructural | | | |
| | Sin daño | Ligero | Significativo | Colapso |
| 0.25 | 83 | 10 | 4 | 3 |
| 0.30 | 27 | 55 | 11 | 7 |
| 0.35 | 0 | 52 | 30 | 18 |
| 0.40 | 0 | 19 | 41 | 40 |

Fuente y Elaboración: El autor

En la figura 61 se observa que el PGA (g) de colapso correspondiente a esta categoría es 0.53. Basándose en la tabla 13; para PGA (g) igual a 0.25 se obtiene mayor probabilidad de daño no estructural (83%), para valores de PGA (g) igual a 0.30, 0.35 se obtiene mayor probabilidad de daño estructural ligero (55 y 52% respectivamente) y para PGA (g) igual a 0.40 se obtiene mayor probabilidad de daño estructural significativo (41%).

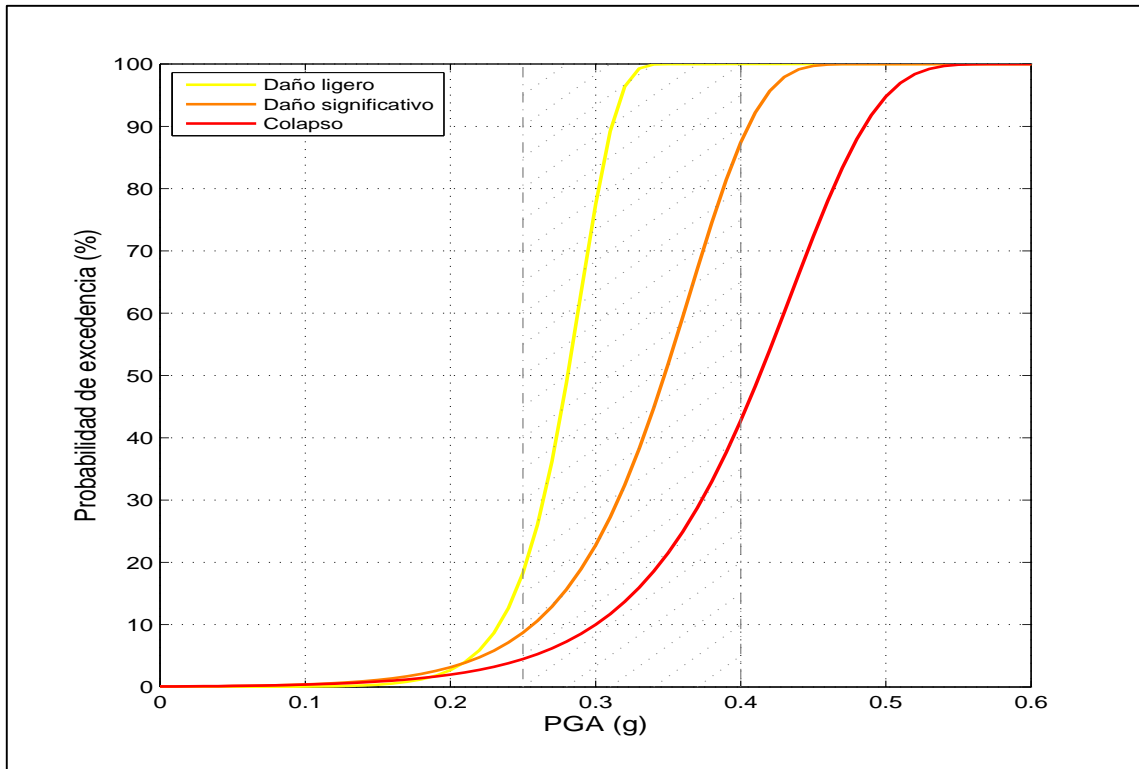


Figura 62. Curvas de vulnerabilidad para tres estados límites – **Categoría 4**
Fuente y Elaboración: El autor

Tabla 14. Matriz de probabilidad de daño – Categoría 4

| Valores de probabilidad de daño (%) | | | | |
|-------------------------------------|----------------------------|--------|---------------|---------|
| PGA (g) | Estado de daño estructural | | | |
| | Sin daño | Ligero | Significativo | Colapso |
| 0.25 | 80 | 11 | 4 | 5 |
| 0.30 | 22 | 54 | 13 | 11 |
| 0.35 | 0 | 47 | 31 | 22 |
| 0.40 | 0 | 12 | 46 | 42 |

Fuente y Elaboración: El autor

En la figura 62 se observa que el PGA (g) de colapso correspondiente a esta categoría es 0.54. Basándose en la tabla 14 para PGA (g) igual a 0.25 se obtiene mayor probabilidad de daño no estructural (80%), para valores de PGA (g) igual a 0.30, 0.35 se obtiene mayor probabilidad de daño estructural ligero (54 y 47% respectivamente) y para PGA (g) igual a 0.40 se obtiene mayor probabilidad de daño estructural significativo (46%). Al presentar los valores de probabilidad de daño menos conservadores es la categoría más vulnerable.

La figura 63 muestra la variación de las probabilidades de daño estructural para los PGA representativos de la zona de estudio en función de las tipologías estructurales.

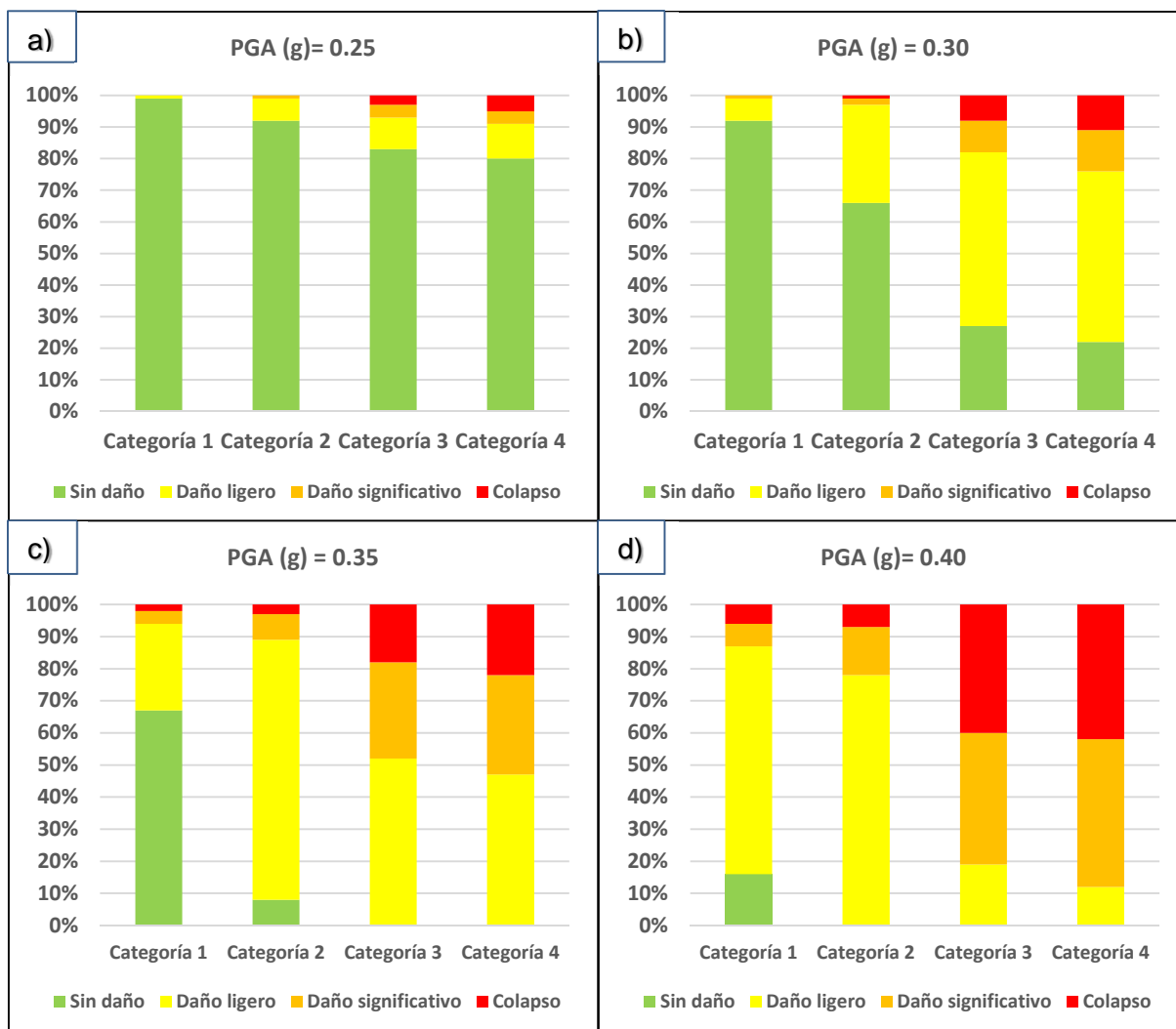


Figura 63. Probabilidad de daño estructural para los PGA representativos de la zona de estudio.
Fuente y Elaboración: El autor

En la figura 63-a se observa que cuando el PGA (g) es 0.25 el daño más representativo es el no estructural para todas las categorías (1 a 4); con probabilidades de ocurrencia igual a 99, 92, 83 y 80% respectivamente. En la figura 63-b se observa que para PGA (g) igual a 0.30 el daño más representativo para las categorías 1 y 2 es el no estructural y para las categorías 3 y 4 es el ligero; con probabilidades de ocurrencia igual a 92, 66, 55 y 54% respectivamente. En la figura 63-c se observa que cuando el PGA (g) es 0.35 el daño más representativo en la categoría 1 es el no estructural y para las categorías 2, 3 y 4 es el ligero; con probabilidades de ocurrencia igual a 67, 81, 52 y 47% respectivamente. En la figura 63-d se observa que para PGA (g) igual a 0.40 el daño más representativo para las categorías 1 y 2 es el ligero, para las categorías 3 y 4 es el significativo, con probabilidades de ocurrencia igual a 71, 78, 41 y 46% respectivamente. En todos los casos el daño estructural aumenta a mayor PGA y a mayor altura de la edificación como era de esperarse.

4.6. Mapas de riesgo sísmico.

En este apartado se muestra los mapas de riesgo sísmico que se obtienen al conocer los valores de PGA (peligro sísmico) de cada edificación, con estos valores y de acuerdo al tipo de edificación se lee la probabilidad de daño para cada estado límite en las curvas de vulnerabilidad correspondientes. Luego, basándose en la posición georreferenciada se grafican los resultados obtenidos asistidos por un SIG.

4.6.1. Mapas de riesgo sísmico por categorías.

Se elaboran mapas por cada categoría para representar el riesgo sísmico georreferenciado de las tipologías estructurales, estos se muestran en los anexos D, E, F y G.

En la tabla 15 se presenta los resultados de riesgo sísmico obtenidos para cada tipología estructural de la zona en estudio.

Tabla 15. Matriz de probabilidad de daño estructural por tipología.

| Tipología | Probabilidad de daño estructural (%) | | | |
|-------------|--------------------------------------|--------|---------------|---------|
| | Sin daño | Ligero | Significativo | Colapso |
| Categoría 1 | 81 | 16 | 2 | 1 |
| Categoría 2 | 30 | 60 | 7 | 3 |
| Categoría 3 | 5 | 39 | 28 | 28 |
| Categoría 4 | 2 | 30 | 37 | 31 |

Fuente y Elaboración: El autor

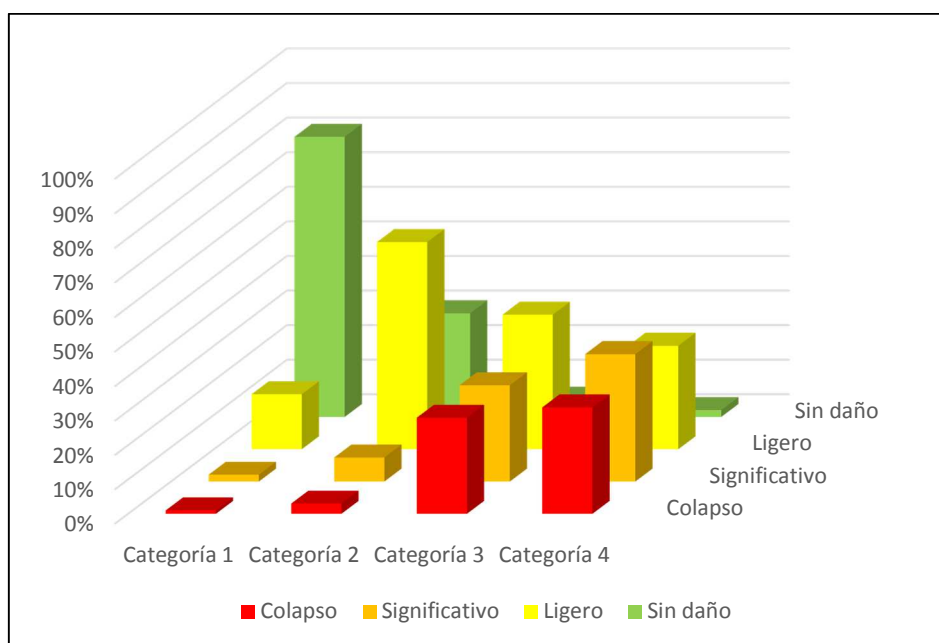


Figura 64. Histograma de probabilidad de daño estructural para las tipologías estructurales establecidas.

Fuente y Elaboración: El autor

La tabla 15 y la figura 64 muestran la probabilidad de daño estructural por tipología. La categoría 1 presenta una probabilidad de daño ligero igual a 16%, de daño significativo igual a 2% y de colapso igual a 1%; el restante 81% no presenta daño estructural. La categoría 2 presenta una probabilidad de daño ligero igual a 60%, de daño significativo igual a 7% y de colapso igual a 3%; el restante 30% no presenta daño estructural. La categoría 3 presenta una probabilidad de daño ligero igual a 39%, de daño significativo igual a 28% y de colapso igual a 28%; el restante 5% no presenta daño estructural. La categoría 4 presenta una probabilidad de daño ligero igual a 30%, de daño significativo igual a 37% y de colapso igual a 31%; el restante 2% no presenta daño estructural.

La categoría 1 presenta el mejor comportamiento ante la demanda sísmica impuesta en esta investigación, debido a su gran rigidez y ductilidad. En su mayoría está conformada por edificaciones con diseños realizados para un número mayor de pisos y en una primera etapa se construyó el primero, presentan probabilidades de daño estructural relativamente bajas (19%), por lo tanto el daño no estructural (81%) es imponente en esta categoría.

La categoría 4 presenta un comportamiento similar a la categoría 3. Las curvas de vulnerabilidad son idénticas más no sus espectros de capacidad, el espectro de la categoría 3 presenta mayor rigidez y el de la categoría 4 mayor ductilidad. Como práctica común las edificaciones de la categoría 4 debido a su altura cuentan con diseños que incorporan criterios sísmo resistentes los mismos son determinantes en el comportamiento de las estructuras ante sollicitaciones sísmicas, por lo tanto su mayor altura no afecta significativamente el desempeño estructural de esta categoría en comparación a la categoría 3.

Las categorías 3 y 4 son más vulnerables debido a su mayor altura, diseños estructurales no adecuados, mano de obra no calificada y controles en los procesos constructivos escasos.

4.6.1.1. Análisis para los sectores más representativos de la zona en estudio.

El Barrio Tierras Coloradas y las ciudadelas Ciudad Victoria y Julio Ordóñez muestran una probabilidad de daño estructural similar, esto se debe a que sus edificaciones se sitúan casi en su totalidad en valores de PGA (g) igual a 0.25 y 0.30, muy cercanos al valor de factor de zona sísmica Z característico de la zona en estudio (0.24), sus efectos de sitio son poco importantes. La ciudadela Ciudad Alegría y el Barrio Esteban Godoy también muestran un daño estructural similar, esto se debe a que sus edificaciones se sitúan en su totalidad en valores de PGA (g) igual a 0.35 y 0.40, por lo tanto los efectos de sitio son importantes e influyen significativamente en la respuesta estructural.

En las tablas 16 a 19 se presentan los resultados de probabilidad de daño estructural para los sectores más representativos de la zona en estudio.

Tabla 16. Matriz de probabilidad de daño estructural para los sectores más representativos de la zona urbana 3 de la ciudad de Loja – **Categoría 1.**

| Sector | Probabilidad de daño estructural (%) | | | |
|----------------------------------|--------------------------------------|--------|---------------|---------|
| | Sin daño | Ligero | Significativo | Colapso |
| Ciudadela Julio Ordóñez | 87 | 11 | 2 | 0 |
| Ciudadela Ciudad Alegría | 34 | 56 | 6 | 4 |
| Ciudadela Ciudad Victoria | 92 | 7 | 1 | 0 |
| Barrio Esteban Godoy | 42 | 49 | 5 | 4 |
| Barrio Tierras Coloradas | 94 | 5 | 1 | 0 |

Fuente y Elaboración: El autor

Para la categoría 1: en el Barrio Tierras Coloradas y las ciudadelas Ciudad Victoria y Julio Ordóñez la probabilidad de daño ligero varía entre 5 y 11%, de daño significativo entre 1 y 2% y la probabilidad de colapso es 0.01%; en la ciudadela Ciudad Alegría y el Barrio Esteban Godoy la probabilidad de daño ligero varía entre 49 y 56%, de daño significativo entre 5 y 6% y la probabilidad de colapso es igual a 4%.

Tabla 17. Matriz de probabilidad de daño estructural para los sectores más representativos de la zona urbana 3 de la ciudad de Loja – **Categoría 2.**

| Sector | Probabilidad de daño estructural (%) | | | |
|----------------------------------|--------------------------------------|--------|---------------|---------|
| | Sin daño | Ligero | Significativo | Colapso |
| Ciudadela Julio Ordóñez | 54 | 42 | 3 | 1 |
| Ciudadela Ciudad Alegría | 4 | 80 | 11 | 5 |
| Ciudadela Ciudad Victoria | 66 | 31 | 2 | 1 |
| Barrio Esteban Godoy | 5 | 81 | 10 | 4 |
| Barrio Tierras Coloradas | 74 | 20 | 5 | 1 |

Fuente y Elaboración: El autor

Para la categoría 2: en el Barrio Tierras Coloradas y las ciudadelas Ciudad Victoria y Julio Ordóñez la probabilidad de daño ligero varía entre 20 y 42%, de daño significativo entre 2 y 5% y la probabilidad de colapso es 1%; en la ciudadela Ciudad Alegría y el Barrio Esteban Godoy la probabilidad de daño ligero varía entre 80 y 81%, de daño significativo entre 10 y 13% y la probabilidad de colapso varía entre 4 y 5%.

Tabla 18. Matriz de probabilidad de daño estructural para los sectores más representativos de la zona urbana 3 de la ciudad de Loja – **Categoría 3.**

| Sector | Probabilidad de daño estructural (%) | | | |
|----------------------------------|--------------------------------------|--------|---------------|---------|
| | Sin daño | Ligero | Significativo | Colapso |
| Ciudadela Julio Ordóñez | 30 | 53 | 10 | 7 |
| Ciudadela Ciudad Alegría | - | - | - | - |
| Ciudadela Ciudad Victoria | 27 | 55 | 10 | 8 |
| Barrio Esteban Godoy | 0 | 38 | 32 | 31 |
| Barrio Tierras Coloradas | 40 | 42 | 11 | 7 |

Fuente y Elaboración: El autor

Para la categoría 3: en el Barrio Tierras Coloradas y las ciudadelas Ciudad Victoria y Julio Ordóñez la probabilidad de daño ligero varía entre 42 y 55%, de daño significativo entre 10 y

11% y la probabilidad de colapso entre 7 y 8%; en el Barrio Esteban Godoy la probabilidad de daño ligero es 38%, de daño significativo es 32% y la probabilidad de colapso es 31%.

Tabla 19. Matriz de probabilidad de daño estructural para los sectores más representativos de la zona urbana 3 de la ciudad de Loja – **Categoría 4.**

| Sector | Probabilidad de daño estructural (%) | | | |
|----------------------------------|--------------------------------------|--------|---------------|---------|
| | Sin daño | Ligero | Significativo | Colapso |
| Ciudadela Julio Ordóñez | 10 | 51 | 22 | 17 |
| Ciudadela Ciudad Alegría | 0 | 31 | 38 | 31 |
| Ciudadela Ciudad Victoria | - | - | - | - |
| Barrio Esteban Godoy | 0 | 40 | 34 | 26 |
| Barrio Tierras Coloradas | - | - | - | - |

Fuente y Elaboración: El autor

Para la categoría 4: la ciudadela Julio Ordóñez muestra una probabilidad de daño ligero igual a 51%, de daño significativo igual a 22% y la probabilidad de colapso es 17%; en la ciudadela Ciudad Alegría y en el Barrio Esteban Godoy la probabilidad de daño ligero varía entre 31 y 40%, de daño significativo entre 34 y 38% y la probabilidad de colapso varía entre 26 y 31%.

4.6.2. Mapas de riesgo sísmico generales.

Las edificaciones de las categorías 1 y 2 al representar el 77% de participación tienen mayor incidencia en los resultados probabilísticos sobre el riesgo sísmico en la zona urbana 3 de la ciudad de Loja. Los mapas se muestran en el anexo H.

En la tabla 20 se muestra una probabilidad para la zona en estudio de daño estructural ligero igual a 40%, de daño estructural significativo igual a 11% y de colapso igual a 8%.

Tabla 20. Matriz de probabilidad de daño estructural para la zona urbana 3 de la ciudad de Loja.

| Probabilidad de daño estructural (%) | | | |
|--------------------------------------|--------|---------------|---------|
| Sin daño | Ligero | Significativo | Colapso |
| 41 | 40 | 11 | 8 |

Fuente y Elaboración: El autor

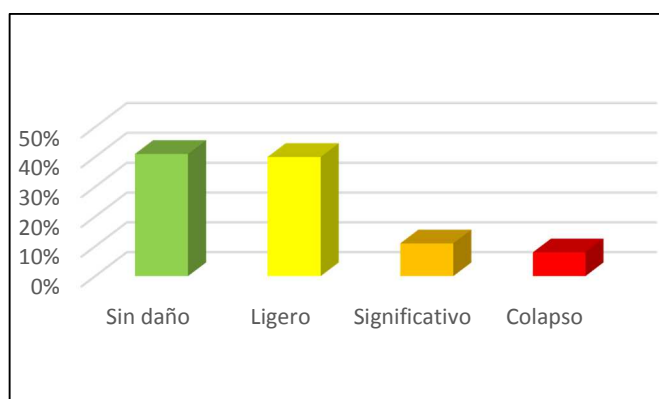


Figura 65. Histograma de probabilidad de daño estructural para la zona urbana 3 de la ciudad de Loja

Fuente y Elaboración: El autor

La zona de estudio presenta una probabilidad de colapso igual a 8%; sus construcciones son relativamente nuevas con un promedio de 13 años de antigüedad y en algunos casos se han diseñado incorporando criterios sismo resistentes dados en códigos de construcción anteriores, además las categorías 1 y 2 tienen un factor de participación del 77% en los resultados recordando que estas presentan un buen comportamiento especialmente la categoría 1 (que en su mayoría está conformada por edificaciones con diseños realizados para un número mayor de pisos y en una primera etapa se construyó únicamente el primero, peculiaridad que contribuye en su respuesta ante sollicitaciones sísmicas), pero al ser comparados con la mayor exigencia del código actual (NEC 2015) se obtiene una probabilidad considerable de colapso.

En nuestra zona de acuerdo a las tipologías estructurales características y a los valores de PGA representativos, se observa que mucha más importancia en el daño estructural tiene la aceleración máxima del terreno PGA que la altura de la edificación, por ejemplo para una estructura de 1 piso (categoría 1) se obtiene una probabilidad media de daño estructural para un PGA (g) de 0.40 (valor máximo) igual a 84% y para una estructura de cuatro pisos (categoría 4 - tipología de mayor altura) situada en un PGA (g) de 0.25 (valor mínimo) se obtiene una probabilidad media de daño estructural igual a 20%.

Del total de información analizada se obtiene que 59% presenta daño estructural. El daño estructural se concentra en el estado de daño ligero con una probabilidad de ocurrencia igual a 40%.

En la tabla 21 se presenta los resultados de probabilidad de daño estructural para los sectores más representativos de la zona en estudio.

Tabla 21. Matriz de probabilidad de daño estructural para los sectores más representativos de la zona urbana 3 de la ciudad de Loja.

| Sector | Probabilidad de daño estructural (%) | | | |
|----------------------------------|--------------------------------------|--------|---------------|---------|
| | Sin daño | Ligero | Significativo | Colapso |
| Ciudadela Julio Ordóñez | 64 | 30 | 4 | 2 |
| Ciudadela Ciudad Alegría | 4 | 77 | 13 | 6 |
| Ciudadela Ciudad Victoria | 77 | 20 | 2 | 1 |
| Barrio Esteban Godoy | 7 | 55 | 21 | 17 |
| Barrio Tierras Coloradas | 84 | 12 | 3 | 1 |

Fuente y Elaboración: El autor

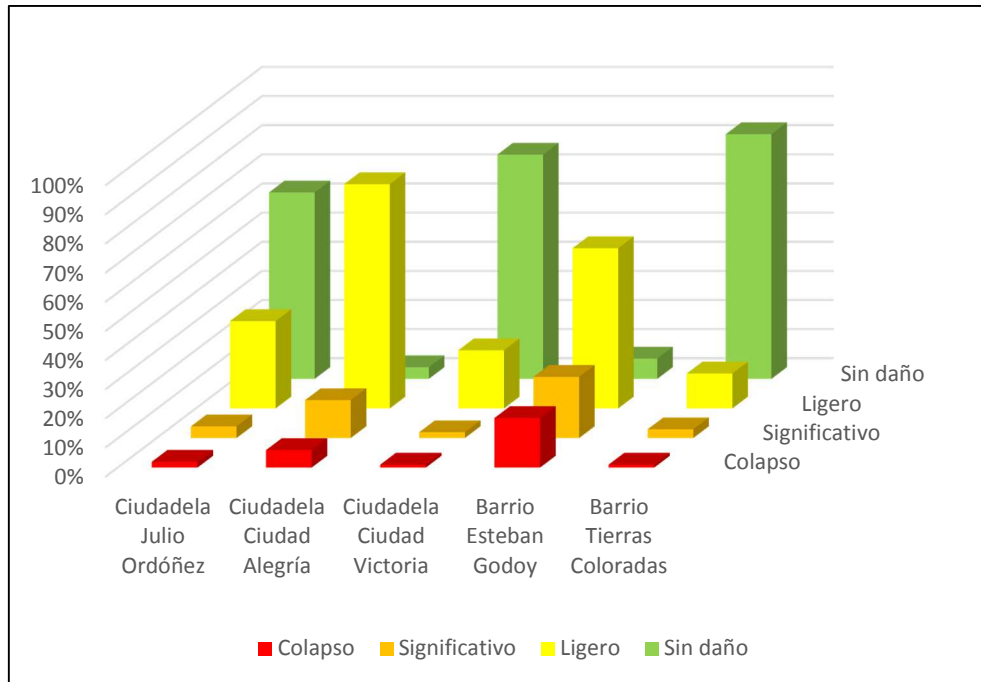


Figura 66. Histograma de probabilidad para los sectores más representativos de la zona urbana 3 de la ciudad de Loja
Fuente y Elaboración: El autor

El Barrio Tierras Coloradas y las ciudadelas Ciudad Victoria y Julio Ordóñez muestran una probabilidad de daño estructural similar, esto se debe a que las edificaciones en estos sectores se sitúan casi en su totalidad en valores de PGA (g) igual a 0.25 y 0.30, muy cercanos al valor de factor de zona sísmica Z característico de la zona en estudio (0.24), sus efectos de sitio son poco importantes. La probabilidad de daño ligero varía entre 12 y 30%, de daño significativo entre 2 y 4% y la probabilidad de colapso entre 1 y 2%.

La ciudadela Ciudad Alegría y el Barrio Esteban Godoy también muestran un daño estructural similar, esto se debe a que las edificaciones en estos sectores se sitúan en su totalidad en valores de PGA (g) igual a 0.35 y 0.40, por lo tanto los efectos de sitio son importantes e influyen significativamente en la respuesta estructural. La probabilidad de daño ligero varía entre 55 y 77%, de daño significativo entre 13 y 21% y la probabilidad de colapso entre 6 y 17%.

El sector de mayor riesgo sísmico es el Barrio Esteban Godoy con una probabilidad de daño estructural igual a 93% y el más seguro es el Barrio Tierras Coloradas con una probabilidad de 16%. En el Barrio Esteban Godoy se justifica su mayor riesgo resultado de que sus edificaciones se sitúan en valores de PGA (g) igual a 0.35 y 0.40, por lo tanto, los efectos de sitio son importantes e influyen significativamente en la respuesta estructural, además la categoría 3 (3 pisos) tiene un factor de participación en la muestra igual a 45%, recordando que las categorías 3 y 4 por su altura son las más vulnerables. En el Barrio Tierras Coloradas

se justifica su menor riesgo resultado de que sus edificaciones se sitúan casi en su totalidad en valores de PGA (g) igual a 0.25 y 0.30, por lo tanto sus efectos de sitio son poco importantes, además la categoría 1 (1 piso) tiene un factor de participación en la muestra igual a 61%, recordando que estas estructuras presentan el mejor comportamiento ante sollicitaciones sísmicas con daños estructurales prácticamente nulos para los valores de PGA antes indicados.

La aceleración máxima del terreno (PGA) a nivel de suelo afecta considerablemente la probabilidad de daño en las estructuras. En los mapas de riesgo sísmico se observa que al occidente de la zona 3 las probabilidades de daño estructural son más bajas por sus menores valores de PGA (0.25, 0.30) e incrementan hacia el oriente en donde sus probabilidades son más altas por sus mayores valores de PGA (0.35, 0.40).

Evidentemente estos resultados no permiten conocer el comportamiento de un edificio en particular, pero se puede utilizar la información obtenida como un resultado previo para identificar las zonas de mayor riesgo y realizar un estudio más detallado.

CONCLUSIONES

Se presentan las conclusiones del estudio preliminar del riesgo sísmico de las edificaciones en la zona urbana 3 de la ciudad de Loja ante la ocurrencia del sismo de diseño:

De la base de datos de información estructural de acuerdo al GEM:

- Aproximadamente un 85% del total de edificaciones corresponden a estructuras aporticadas de hormigón armado de uso residencial, comercial y mixto (residencial y comercial); tipología de edificaciones en la cual se enfoca esta investigación.
- Se identificaron en las edificaciones de estudio cuatro categorías estructurales características, así tenemos: categoría 1, estructuras de 1 piso con 3 vanos; categoría 2, estructuras de 2 pisos con 3 vanos; categoría 3, estructuras de 3 pisos con 4 vanos y categoría 4, estructuras de 4 pisos con 5 vanos.
- Las estructuras de hormigón armado obtienen un promedio de 13 años de antigüedad.

De las curvas de vulnerabilidad sísmica:

- Un terremoto que genere un valor de PGA (aceleración máxima del suelo) igual a 0.6 (g) provocaría el colapso total de las estructuras en estudio.
- Para los valores PGA (0.25 – 0.40 g) de la zona de estudio se observa que el desempeño estructural medio de las tipologías estructurales es el siguiente: la categoría 1 está dentro del rango elástico, la categoría 2 entra a fluencia y las categorías 3 y 4 se localizan en el rango plástico. Por lo tanto, la categoría 1 muestra el mejor comportamiento sísmico y las categorías 3 y 4 son las más vulnerables.

De los mapas de riesgo sísmico para cada tipología estructural:

- La categoría 1 presenta una probabilidad promedio de daño estructural igual a 19%, distribuido así: 16% para el daño ligero, 2% para el daño significativo y 1% de colapso; el restante 81% no presenta daños estructurales.
- La categoría 2 presenta una probabilidad promedio de daño estructural igual a 70%, distribuido así: 60% para el daño ligero, 7% para el daño significativo y 3% de colapso; el restante 30% no presenta daños estructurales.
- La categoría 3 presenta una probabilidad promedio de daño estructural igual a 95%, distribuido así: 39% para el daño ligero, 28% para el daño significativo y 28% de colapso; el restante 5% no presenta daños estructurales.
- La categoría 4 presenta una probabilidad promedio de daño estructural igual a 98%, distribuido así: 30% para el daño ligero, 37% para el daño significativo y 31% de colapso; el restante 2% no presenta daños estructurales.

De los resultados de riesgo sísmico para los sectores más representativos:

- El Barrio Esteban Godoy presenta el mayor riesgo sísmico con una probabilidad promedio de daño estructural igual a 93%, distribuido así: 55% para el daño ligero, 21% para el daño significativo y 17% de colapso y el sector de menor riesgo es Tierras Coloradas con una probabilidad promedio de daño estructural igual a 16%, distribuido así: 12% para el daño ligero, 3% para el daño significativo y 1% de colapso.
- En el Barrio Esteban Godoy se justifica su mayor riesgo sísmico resultado de que sus edificaciones se sitúan en lugares en los cuales los efectos de sitio son importantes e influyen significativamente en la respuesta estructural, además la categoría 3 tiene una participación en la muestra del 45%, recordando que las categorías 3 y 4 por su altura son las más vulnerables. En el Barrio Tierras Coloradas su menor riesgo sísmico se justifica resultado de que sus edificaciones se sitúan en lugares en los cuales los efectos de sitio son poco importantes, además la categoría 1 tiene una participación en la muestra del 61%, recordando que estas estructuras presentan el mejor comportamiento ante demandas sísmicas.

De los mapas de riesgo sísmico para la zona:

- Las edificaciones de las categorías 1 y 2 representan el 77% de participación, por lo tanto tienen mayor incidencia en los resultados probabilísticos sobre el riesgo sísmico.
- La zona de estudio presenta una probabilidad promedio de daño estructural igual a 59%, distribuido así: 40% para el daño ligero, 11% para el daño significativo y 8% de colapso; el restante 41% no presenta daños estructurales. El daño estructural se concentra en el estado ligero.
- Aproximadamente 20% de las edificaciones sufrirán daños estructurales graves: 11% presentan daño significativo y corresponden aproximadamente a 535, estas estructuras no pueden ser utilizadas después del terremoto sin fortalecimiento, por otra parte no podría ser económicamente ventajoso hacer una reparación del edificio (Borzi et al., 2008); 8% exceden el estado límite de colapso y equivalen aproximadamente a 390, cantidad considerable fundamento que según Aguiar (2008) ante el sismo de diseño del Código no puede colapsar ninguna estructura.
- El sector occidental de la zona en estudio exhibe lugares con efectos de sitio poco significativos, por lo tanto el peligro sísmico y a la vez el riesgo es menor; los mismos son idóneos para futuros asentamientos humanos desde un enfoque sísmico.
- Finalmente se concluye que las edificaciones en la zona urbana 3 de la ciudad de Loja presentan un riesgo sísmico moderado; estos resultados son válidos para la zona de estudio, no constituyen el riesgo sísmico de la ciudad.

FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

- Obtener datos estadísticos mediante ensayos destructivos en cuanto a cuantía de acero y resistencia a la compresión en elementos estructurales para evaluar de mejor manera la capacidad estructural de las edificaciones.
- Mejorar el muestreo de estructuras relacionado a características geométricas para representar de mejor manera las funciones de distribución de probabilidad de las variables analizadas.
- En esta investigación se realiza un análisis de pórtico plano en dos dimensiones, el siguiente paso es hacer el análisis en tres dimensiones; de manera que permita incorporar los efectos en la respuesta sísmica de aquellas estructuras que presenten irregularidades estructurales.
- Hacer una extensión del estudio para considerar otras tipologías existentes en la zona, como por ejemplo, edificaciones de madera y metal.
- Incorporar al estudio variables que permitan estimar el coste económico de reposición o fortalecimiento de las estructuras y el número de pérdidas de vidas humanas.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguiar, R. (2008). *Análisis Sísmico de Edificios*. Quito: Centro de Investigaciones Científicas.
- Anguizola, E. (2012). *Modelacion Probabilistica del Riesgo Sísmico para La Ciudad de David*. Panamá.
- Bal, I. E., Pinho, R., & Crowley, H. (2010). *Displacement-Based Earthquake Loss Assessment: Method Development and Application to Turkish Building Stock*. Italy.
- Barbat, A. (1998). *El riesgo sísmico en el diseño de edificios*. Calidad Siderúrgica.
- Bird, J., & Bommer, J. (2004). *Earthquake losses due to ground failure*. Engineering Geology.
- Bonett, R. (2003). *Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico de Edificios. Aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada*. Barcelona: Universidad Técnica de Cataluña.
- Borzi, B., Pinho, R., & Crowley, H. (2008). *Simplified pushover-based vulnerability analysis for large-scale assessment of RC buildings*. Engineering Structures.
- Castillo, D. (2013). *Peligro Sísmico de la Cuenca de Loja-Ecuador*. Loja: Universidad Técnica Particular de Loja.
- Crowley, H., Bommer, J., & Pinho, R. (2006). *Displacement-based earthquake loss assessment*. Engineering Structures.
- Dumova, E. (2000). *Fragility curves for reinforced concrete structures in Skopje region*. Macedonia.
- Duque, P. (2011). *Estudio sobre la calidad de hormigones y materiales en las edificaciones en el sector sur de la ciudad de Loja*. Loja: Universidad Técnica Particular de Loja.
- Fajfar, P. (2000). *A nonlinear analysis method for performance – based seismic design*. Earthquake Spectra.
- Faulín, J., & Juan, Á. (2009). *Simulación Monte Carlo con Excel*. Cataluña: Universidad Abierta de Cataluña.
- GEM Foundation - Global Earthquake Model. (2016). Recuperado 28 de enero, a partir de <http://www.globalquakemodel.org/>
- International Strategy for Disaster Reduction. (2016). Recuperado 29 de enero, a partir de http://www.eird.org/esp/revista/No4_2001/pagina13.htm

- Khalfan, M. (2013). *Fragility Curves for Residential Buildings in Developing Countries: A Case Study on Non-Engineered Unreinforced Masonry Homes in Bantul, Indonesia*. Ontario, Canada.
- Martínez, J. (2012). *Caracterización de la Vulnerabilidad Sísmica Utilizando Curvas de Fragilidad y Matrices de Probabilidad de Daño para Algunas Tipologías Estructurales de Hormigón Armado. Aplicación a La Ciudad de Valdivia, Región de Los Ríos*. Chile.
- Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M., Fenves, G., et al. (2007). *OpenSees Command Language Manual*. Berkeley: University of California
- Mendoza, D. (2012). *Sensibilidad a parámetros de modelamiento estructural e incertidumbre relacionada*. Loja: Universidad Técnica Particular de Loja.
- Moreno, R. (2006). *Evaluación del riesgo sísmico en edificios mediante análisis estático no lineal: Aplicación a diversos escenarios sísmicos de Barcelona*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Norma Ecuatoriana de la Construcción. (2015). *NEC – SE – DS: Peligro Sísmico y Diseño Sismo Resistente*.
- Norma Ecuatoriana de la Construcción. (2015). *NEC – SE – RE: Riesgo Sísmico, Evaluación y Rehabilitación de Estructuras*.
- OpenStreetMap. (2016). Recuperado 9 de marzo, a partir de <http://www.openstreetmap.org/>
- Pacific Earthquake Engineering Research Center. (2015). *OpenSees*. Obtenido de <http://opensees.berkeley.edu/index.php>
- Real Academia Española (2009). *Definición de taxonomía*. Vigésimo tercera edición. España.
- Sarango, A. (2013). *Construcción de un mapa de vulnerabilidad sísmica de las edificaciones esenciales del sector sur de la ciudad de Loja comprendido entre las calles Celica – Aristóteles y Río Marañón – Av. Los Paltas*. Loja: Universidad Técnica Particular de Loja.
- Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica. (2016.) Recuperado 26 de enero, a partir de <http://www.smis.org.mx/htm/sm5.htm>
- Velásquez, J. (2006). *Estimación de Pérdidas Sísmicas Mediante Curvas de Fragilidad Analíticas*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.

ANEXOS

ANEXO A. Global Earthquake Model – Direct Observation Tools, software para el levantamiento de información estructural según la taxonomía del GEM.

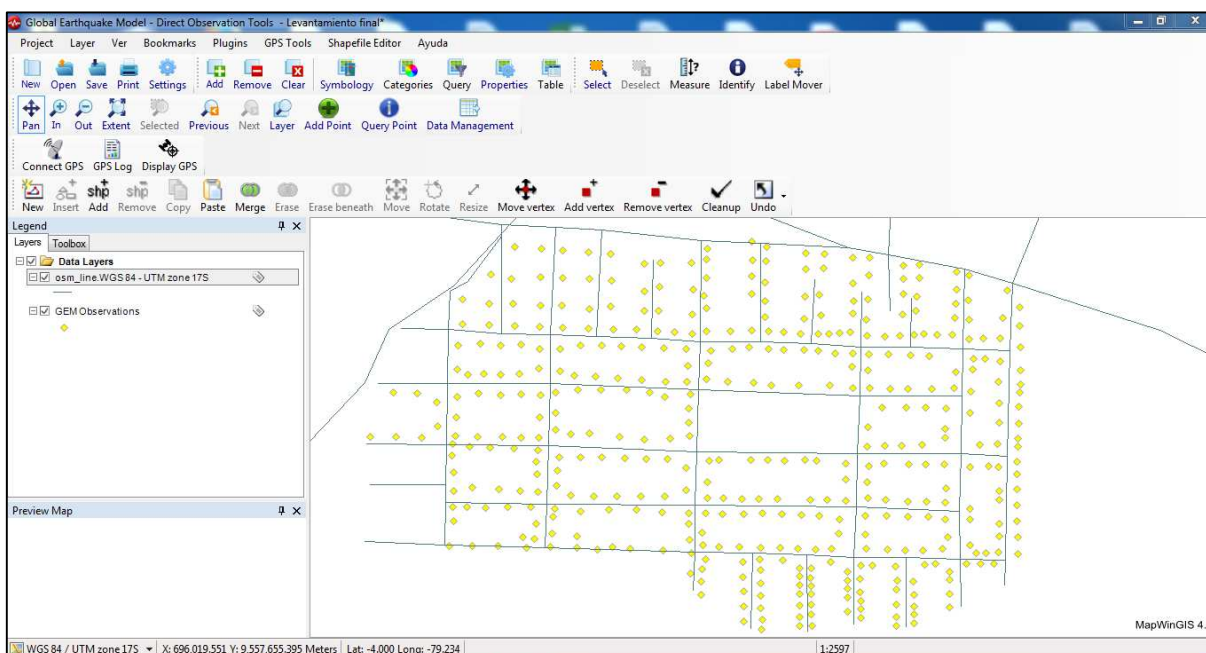


Figura 67. Interfaz gráfica del software GEM – DOT
Fuente y Elaboración: El autor

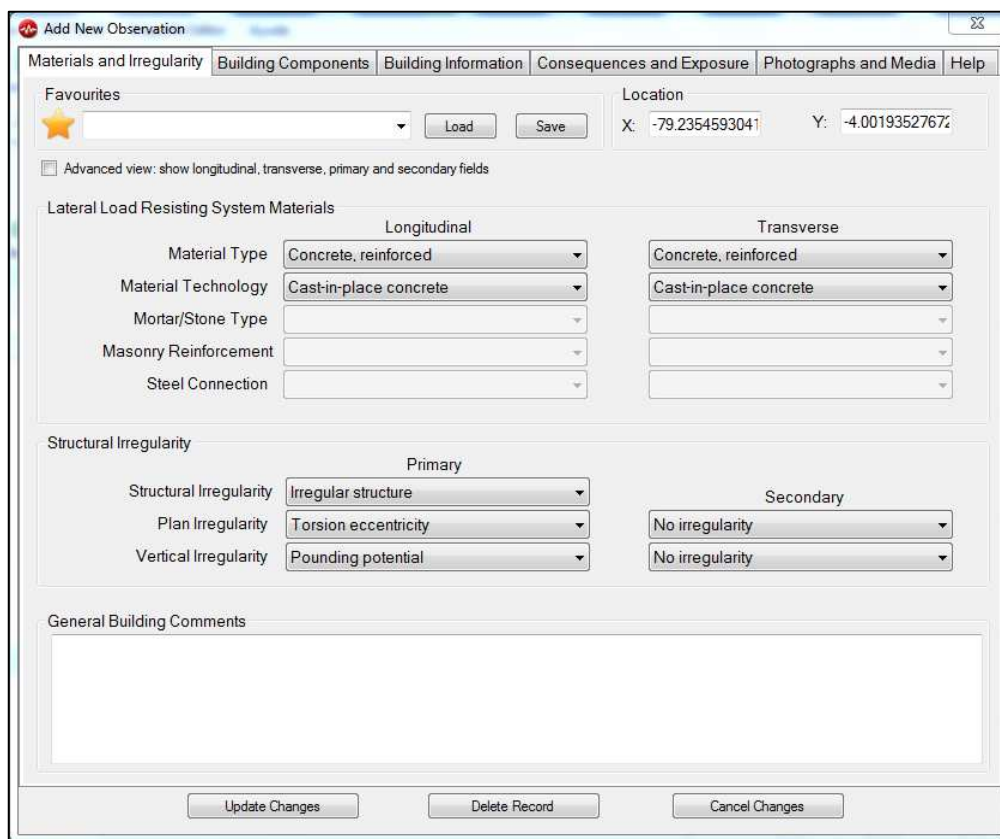


Figura 68. Añadir nueva observación (Materiales e irregularidad)
Fuente y Elaboración: El autor

Add New Observation

Materials and Irregularity | **Building Components** | Building Information | Consequences and Exposure | Photographs and Media | Help

Lateral Load Resisting System (LLRS)

Longitudinal Transverse

LLRS Infilled frame Infilled frame

System Ductility Non-ductile Non-ductile

Roof

Roof Shape Flat

Roof Cover Material Concrete roof without additional covering

Roof System Material Concrete

Roof System Type Cast-in-place beam-supported reinforced concrete roof

Roof Connection Connection present

Floor and Foundations

Floor System Material Concrete

Floor System Type Cast-in-place beam-supported RC floor

Floor Connection Connection present

Foundation System Shallow foundation, with lateral capacity

Exterior Walls

Material of Exterior Walls (non-structural) Masonry

Update Changes Delete Record Cancel Changes

Figura 69. Añadir nueva observación (Componentes del Edificio)

Fuente y Elaboración: El autor

Add New Observation

Materials and Irregularity | Building Components | **Building Information** | Consequences and Exposure | Photographs and Media | Help

Building Occupancy

Occupancy Residential

Occupancy - Detailed Single dwelling

Date

Year of Construction/Retrofit (yyyy) Approximately 2006

Height

No. Storeys Above Ground Exactly 2

No. Storeys Below Ground Exactly 0

Height of Ground Floor Above Grade (centimetres) Exactly 280

Building Setting

Slope (degrees) 0

Position within a Block Adjoining buildings on two sides

Plan Shape Square, solid

Update Changes Delete Record Cancel Changes

Figura 70. Añadir nueva observación (Información del Edificio)

Fuente y Elaboración: El autor

The screenshot shows the 'Add New Observation' window with the 'Exposure' and 'Consequences' sections active. The 'Exposure' section includes input fields for 'Number of Day Occupants' (5), 'Number of Night Occupants' (5), 'Number of Transit Occupants' (0), 'Number of Dwellings' (1), 'Plan Area (m²)' (80), and 'Replacement Cost (per m²)' (280). A 'Currency' dropdown menu is set to 'United States Dollar'. The 'Consequences' section includes input fields for 'Number of Fatalities', 'Number of Injured', and 'Number Missing', a 'Damage Grade' dropdown menu, and a 'Comments' field containing the text 'This information is unknown'. At the bottom, there are three buttons: 'Update Changes', 'Delete Record', and 'Cancel Changes'.

Figura 71. Añadir nueva observación (Consecuencias y Exposición)
Fuente y Elaboración: El autor

The screenshot shows the 'Add New Observation' window with the 'Photographs and Media' section active. It features a table with the following columns: 'Media Type', 'Frame Number', 'Original Filename', 'GEM Filename', and 'Comments'. The table contains one row with a 'Photograph' media type, an empty frame number, an original filename starting with 'C:\Users\...', and a GEM filename starting with '56953de8:...'. Below the table is a large grey rectangular area. At the bottom, there are three buttons: 'Update Changes', 'Delete Record', and 'Cancel Changes'.

| Media Type | Frame Number | Original Filename | GEM Filename | Comments |
|------------|--------------|-------------------|--------------|----------|
| Photograph | | C:\Users\... | 56953de8:... | |

Figura 72. Añadir nueva observación (Fotografía y Medios)
Fuente y Elaboración: El autor

ANEXO B. Información estadística obtenida a partir de la base de datos de información estructural de acuerdo al GEM.

Tabla 22. Participación y número de edificaciones en función del sistema estructural

| Material del sistema estructural | Número de edificaciones | Participación (%) |
|---|--------------------------------|--------------------------|
| Hormigón armado | 2521 | 90 |
| Mampostería | 49 | 2 |
| Acero | 33 | 1 |
| Madera | 198 | 7 |

Fuente y Elaboración: El autor

Tabla 23. Participación y número de edificaciones de HA en función del número de pisos

| Número de pisos | Número de edificaciones | Participación (%) |
|------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| 1 | 829 | 33 |
| 2 | 1097 | 44 |
| 3 | 474 | 19 |
| 4 | 101 | 4 |
| 5 | 18 | 1 |
| 6 y 7 | 2 | 0.08 |

Fuente y Elaboración: El autor

Tabla 24. Participación y número de edificaciones de HA en función de la tipología de ocupación

| Ocupación | Número de edificaciones | Participación (%) |
|---------------------|--------------------------------|--------------------------|
| Asamblea (Iglesias) | 10 | 0.39 |
| Comercial | 21 | 0.84 |
| Educación | 56 | 2.21 |
| Gobierno | 9 | 0.34 |
| Mixto (Res y Com) | 132 | 5.24 |
| Residencial | 2260 | 89.66 |
| Otros y desconocido | 33 | 1.34 |

Fuente y Elaboración: El autor

Tabla 25. Participación y número de edificaciones de HA en función de la forma del sistema de techo

| Forma del sistema de techo | Número de edificaciones | Participación (%) |
|--|--------------------------------|--------------------------|
| Cubierta plana | 1396 | 55.4 |
| Cubierta inclinada en dos direcciones | 763 | 30.3 |
| Cubierta inclinada en cuatro direcciones | 50 | 2.0 |
| Cubierta inclinada en una dirección | 122 | 4.8 |
| Cubierta curva | 4 | 0.2 |
| Otros y desconocido | 186 | 7.4 |

Fuente y Elaboración: El autor

Tabla 26. Participación y número de edificaciones de HA en función del material de la cubierta de techo

| Material de la cubierta de techo | Número de edificaciones | Participación (%) |
|----------------------------------|-------------------------|-------------------|
| Concreto | 1351 | 53.6 |
| Teja | 187 | 7.4 |
| Fibro-cemento | 93 | 3.7 |
| Metal | 773 | 30.7 |
| Otros y desconocido | 117 | 4.6 |

Fuente y Elaboración: El autor

Tabla 27. Participación y número de edificaciones de HA en función del material de relleno en los marcos

| Material de relleno en los marcos | Número de edificaciones | Participación (%) |
|-----------------------------------|-------------------------|-------------------|
| Mampostería (ladrillo o bloque) | 2466 | 97.8 |
| Vidrio | 5 | 0.2 |
| Hormypol | 30 | 1.2 |
| Otros y desconocido | 20 | 0.8 |

Fuente y Elaboración: El autor

Tabla 28. Participación y número de edificaciones de HA en función de la irregularidad en planta observada o visible

| Irregularidad en planta observada | Número de edificaciones | Participación (%) |
|-----------------------------------|-------------------------|-------------------|
| Regular | 1149 | 77 |
| Torsión | 179 | 12 |
| Esquina reentrante | 134 | 9 |
| Otra irregularidad en planta | 30 | 2 |

Fuente y Elaboración: El autor

Tabla 29. Participación y número de edificaciones de HA en función de la irregularidad vertical observada o visible

| Irregularidad vertical observada | Número de edificaciones | Participación (%) |
|-----------------------------------|-------------------------|-------------------|
| Regular | 993 | 71 |
| Piso blando | 18 | 1.3 |
| Columna corta | 20 | 1.4 |
| Separación sísmica insuficiente | 143 | 10.2 |
| Cambio brusco en el perfil | 140 | 10 |
| Cambios en la estructura vertical | 39 | 2.8 |
| Otra irregularidad vertical | 46 | 3.3 |

Fuente y Elaboración: El autor

Tabla 30. Participación y número de edificaciones de HA en función del año de construcción

| Año de construcción | Número de edificaciones | Participación (%) |
|----------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| 1975-1990 | 61 | 2.4 |
| 1991-1995 | 228 | 9 |
| 1996-2000 | 175 | 6.9 |
| 2001-2005 | 264 | 15.5 |
| 2006-2010 | 1080 | 37.8 |
| 2011-2015 | 205 | 8.1 |
| Desconocido | 509 | 20.2 |

Fuente y Elaboración: El autor

Tabla 31. Participación y número de edificaciones de HA en función de la tecnología de hormigón del marco

| Tecnología del hormigón del marco de HA | Número de edificaciones | Participación (%) |
|--|--------------------------------|--------------------------|
| Colado in situ | 2496 | 99 |
| Desconocido | 25 | 1 |

Fuente y Elaboración: El autor

Tabla 32. Participación y número de edificaciones de estudio (uso residencial, comercial y mixto) en función del PGA por cada tipología estructural

| Categoría 1 | | |
|--------------------|--------------------------------|--------------------------|
| PGA (g) | Número de edificaciones | Participación (%) |
| 0.25 | 50 | 6 |
| 0.30 | 506 | 63 |
| 0.35 | 186 | 24 |
| 0.40 | 57 | 7 |
| Categoría 2 | | |
| PGA (g) | Número de edificaciones | Participación (%) |
| 0.25 | 25 | 2 |
| 0.30 | 387 | 36 |
| 0.35 | 402 | 38 |
| 0.40 | 253 | 24 |
| Categoría 3 | | |
| PGA (g) | Número de edificaciones | Participación (%) |
| 0.25 | 2 | 0 |
| 0.30 | 74 | 16 |
| 0.35 | 205 | 45 |
| 0.40 | 179 | 39 |
| Categoría 4 | | |
| PGA (g) | Número de edificaciones | Participación (%) |
| 0.30 | 5 | 16 |
| 0.35 | 46 | 45 |
| 0.40 | 48 | 39 |

Fuente y Elaboración: El autor

Tabla 33. Participación (%) de las edificaciones de estudio en función del PGA para los sectores más representativos de la zona en análisis por cada tipología estructural

| PGA (g) | Categoría 1 | | | | |
|---------|-------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------|--------------------------|
| | Ciudadela Julio Ordóñez | Ciudadela Ciudad Alegría | Ciudadela Ciudad Victoria | Barrio Esteban Godoy | Barrio Tierras Coloradas |
| 0.25 | - | - | - | - | 48 |
| 0.30 | 79 | - | 100 | - | 49 |
| 0.35 | 21 | 33 | - | 51 | 3 |
| 0.40 | - | 67 | - | 49 | - |
| PGA (g) | Categoría 2 | | | | |
| | Ciudadela Julio Ordóñez | Ciudadela Ciudad Alegría | Ciudadela Ciudad Victoria | Barrio Esteban Godoy | Barrio Tierras Coloradas |
| 0.25 | - | - | - | - | 50 |
| 0.30 | 78 | - | 100 | - | 48 |
| 0.35 | 22 | 51 | - | 65 | 2 |
| 0.40 | - | 49 | - | 35 | - |
| PGA (g) | Categoría 3 | | | | |
| | Ciudadela Julio Ordóñez | Ciudadela Ciudad Alegría | Ciudadela Ciudad Victoria | Barrio Esteban Godoy | Barrio Tierras Coloradas |
| 0.25 | - | - | - | - | 29 |
| 0.30 | 100 | - | 100 | - | 57 |
| 0.35 | - | - | - | 59 | 14 |
| 0.40 | - | - | - | 41 | - |
| PGA (g) | Categoría 4 | | | | |
| | Ciudadela Julio Ordóñez | Ciudadela Ciudad Alegría | Ciudadela Ciudad Victoria | Barrio Esteban Godoy | Barrio Tierras Coloradas |
| 0.30 | 50 | - | - | - | - |
| 0.35 | 50 | 53 | - | 79 | - |
| 0.40 | - | 47 | - | 21 | - |

Fuente y Elaboración: El autor

Tabla 34. Participación y número de edificaciones de estudio para cada tipología estructural

| Tipología | Número de edificaciones | Participación (%) |
|-------------|-------------------------|-------------------|
| Categoría 1 | 799 | 33 |
| Categoría 2 | 1067 | 44 |
| Categoría 3 | 460 | 19 |
| Categoría 4 | 99 | 4 |

Fuente y Elaboración: El autor

Tabla 35. Participación (%) de las edificaciones de estudio en función de la tipología estructural para los sectores más representativos de la zona en análisis

| Tipología | Ciudadela Julio Ordóñez | Ciudadela Ciudad Alegría | Ciudadela Ciudad Victoria | Barrio Esteban Godoy | Barrio Tierras Coloradas |
|-------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------|--------------------------|
| Categoría 1 | 45 | 1 | 48 | 13 | 61 |
| Categoría 2 | 39 | 93 | 49 | 36 | 34 |
| Categoría 3 | 11 | - | 4 | 45 | 5 |
| Categoría 4 | 5 | 6 | - | 6 | - |

Fuente y Elaboración: El autor

ANEXO C. Memoria fotográfica de edificaciones por cada tipología estructural.



Figura 73. Edificación de uso residencial – Categoría 1, ejemplo # 1
Fuente y Elaboración: El autor



Figura 74. Edificación de uso residencial – Categoría 1, ejemplo # 2
Fuente y Elaboración: El autor



Figura 75. Edificación de uso residencial – Categoría 2, ejemplo # 1
Fuente y Elaboración: El autor



Figura 76. Edificación de uso residencial – Categoría 2, ejemplo # 2
Fuente y Elaboración: El autor



Figura 77. Edificación de uso residencial – Categoría 3, ejemplo # 1
Fuente y Elaboración: El autor



Figura 78. Edificación de uso residencial – Categoría 3, ejemplo # 2
Fuente y Elaboración: El autor

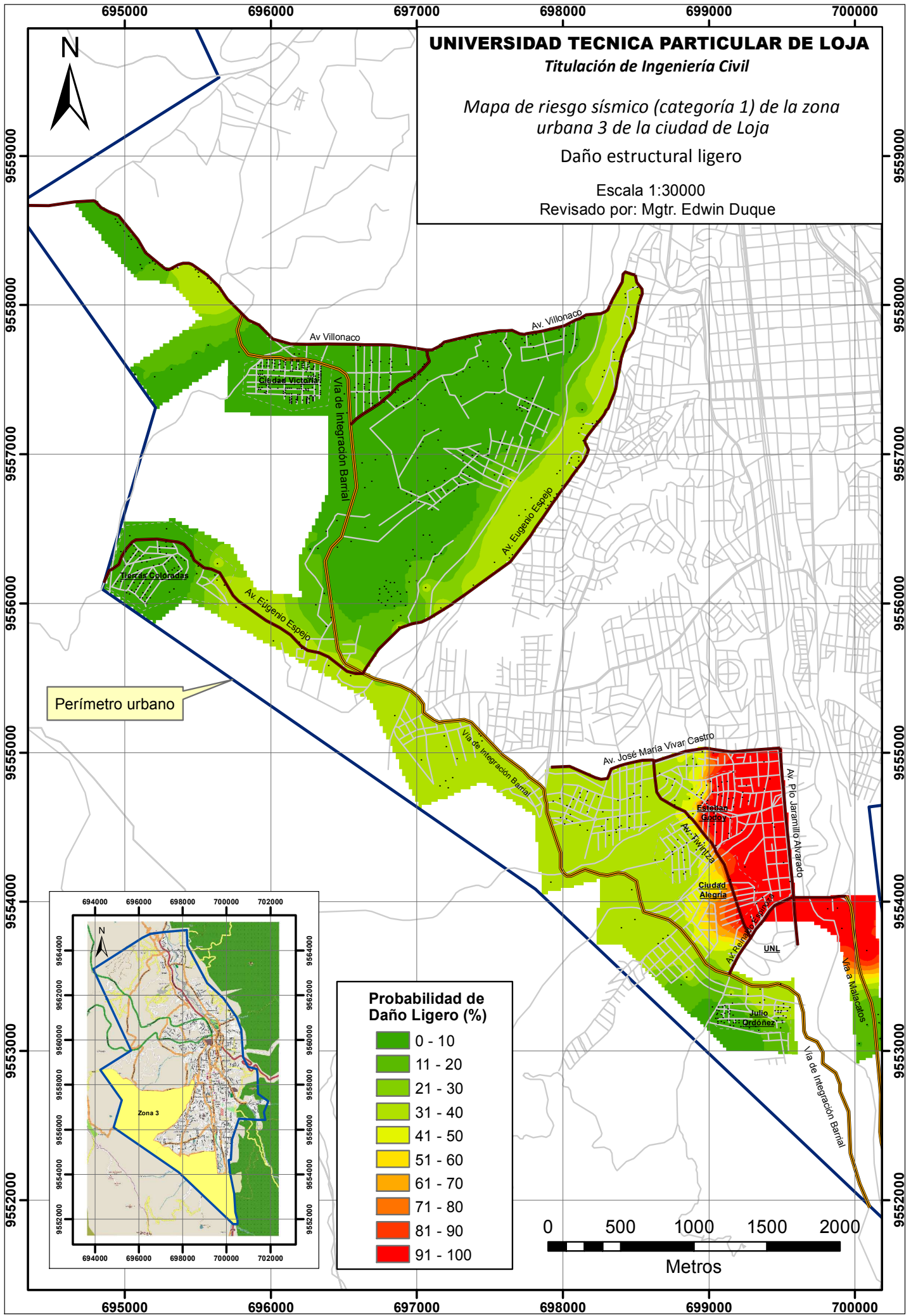


Figura 79. Edificación de uso residencial – Categoría 4, ejemplo # 1
Fuente y Elaboración: El autor



Figura 80. Edificación de uso residencial – Categoría 4, ejemplo # 2
Fuente y Elaboración: El autor

ANEXO D. Mapas de riesgo sísmico – Categoría 1.



UNIVERSIDAD TECNICA PARTICULAR DE LOJA

Titulación de Ingeniería Civil

Mapa de riesgo sísmico (categoría 1) de la zona urbana 3 de la ciudad de Loja

Daño estructural ligero

Escala 1:30000

Revisado por: Mgtr. Edwin Duque

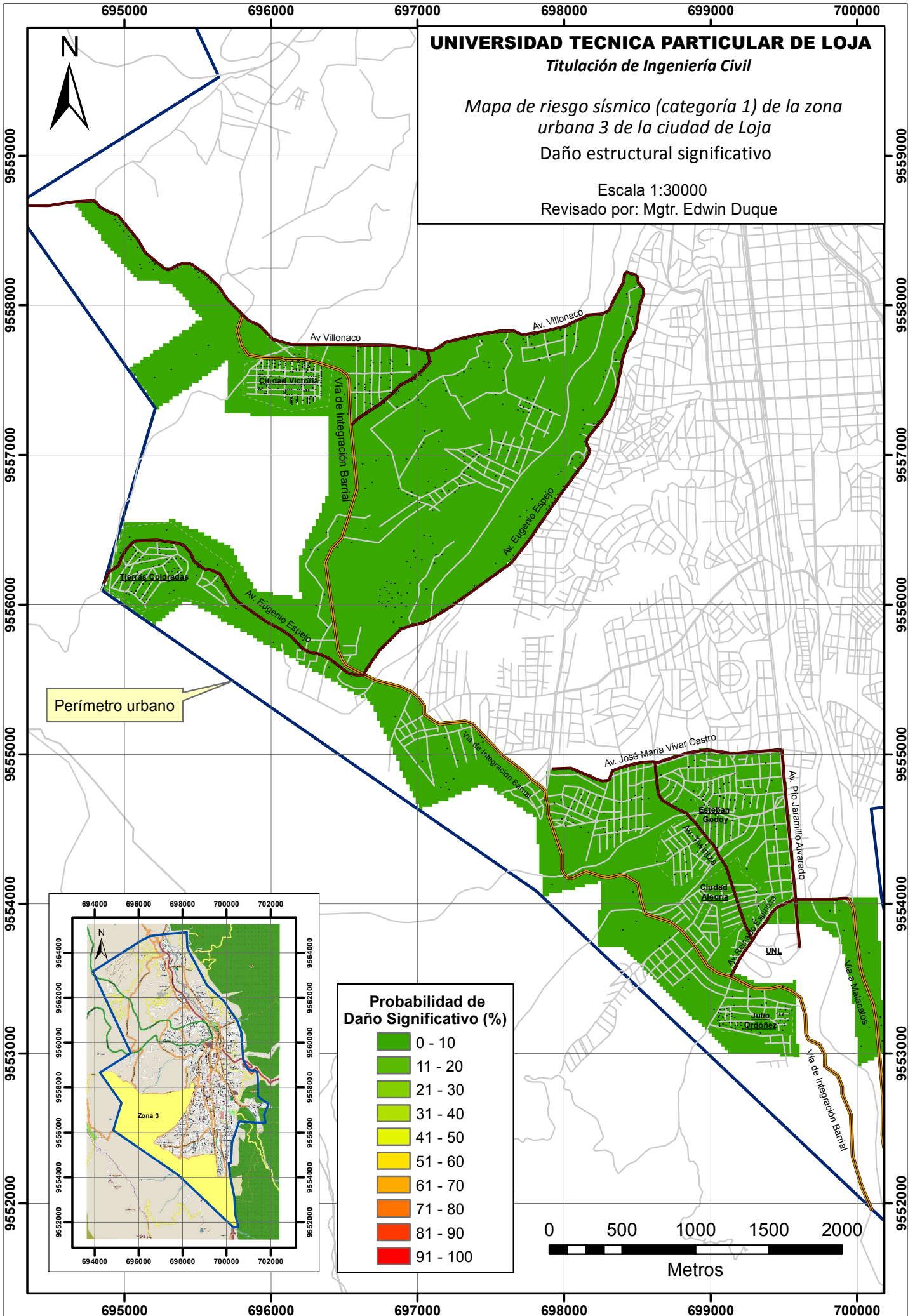
Perímetro urbano

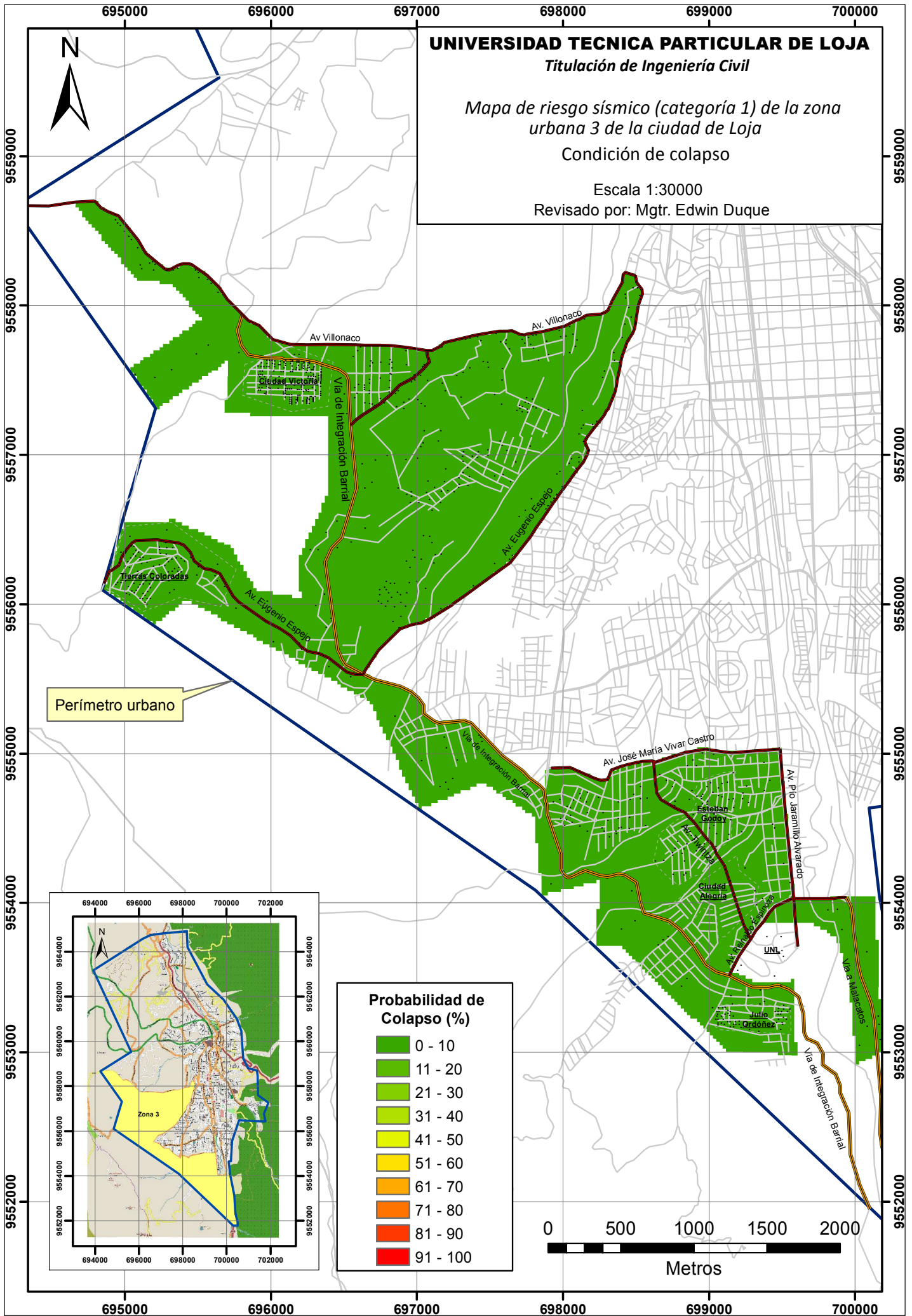
Probabilidad de Daño Ligero (%)

- 0 - 10
- 11 - 20
- 21 - 30
- 31 - 40
- 41 - 50
- 51 - 60
- 61 - 70
- 71 - 80
- 81 - 90
- 91 - 100

0 500 1000 1500 2000

Metros





ANEXO E. Mapas de riesgo sísmico – Categoría 2.

UNIVERSIDAD TECNICA PARTICULAR DE LOJA

Titulación de Ingeniería Civil

Mapa de riesgo sísmico (categoría 2) de la zona urbana 3 de la ciudad de Loja

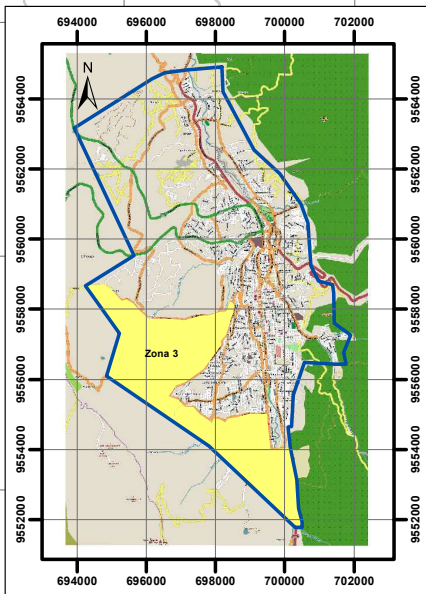
Daño estructural ligero

Escala 1:30000

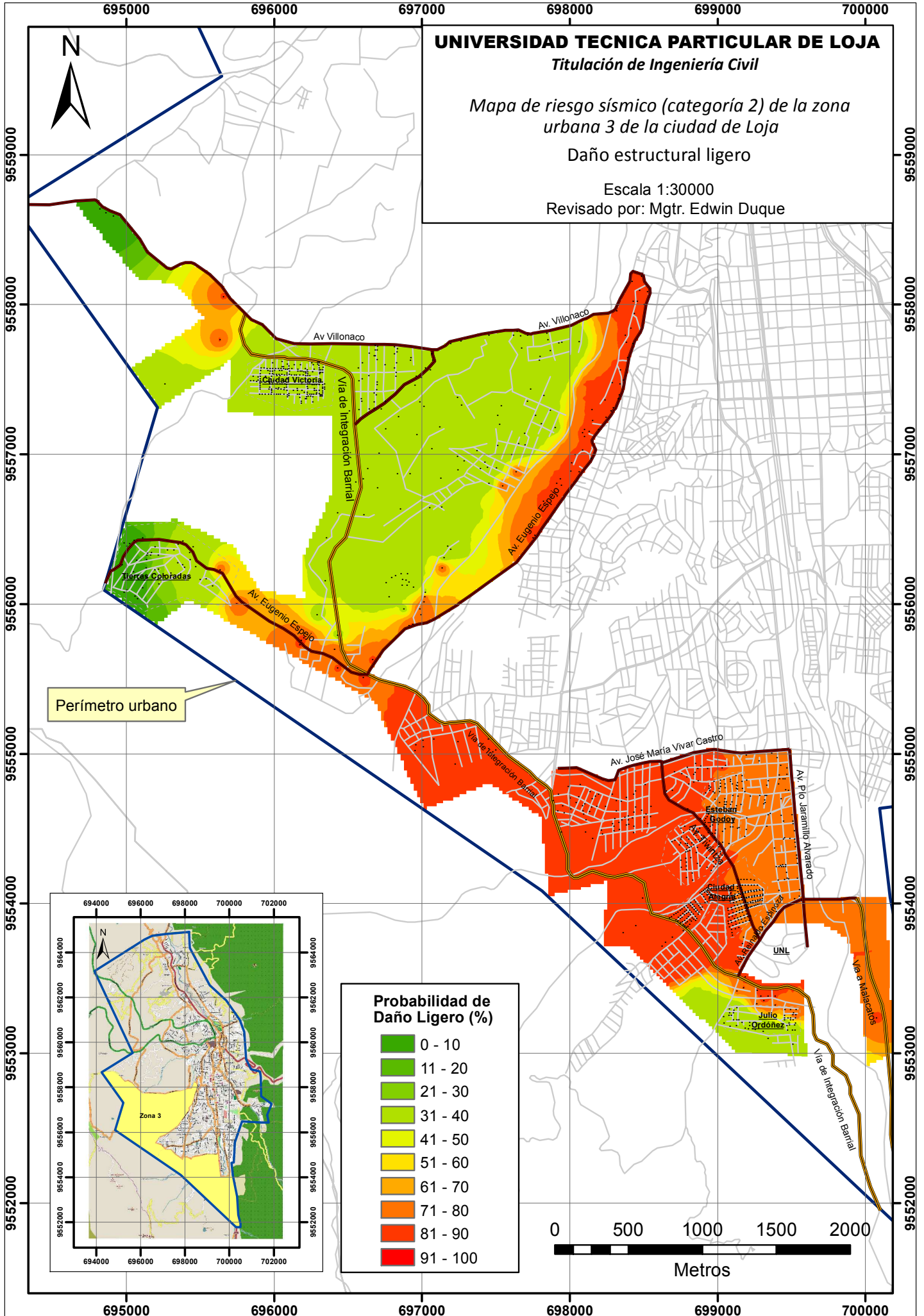
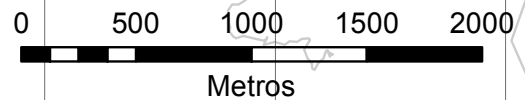
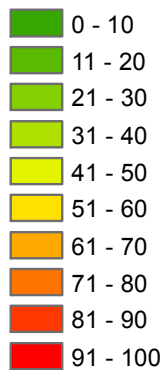
Revisado por: Mgtr. Edwin Duque

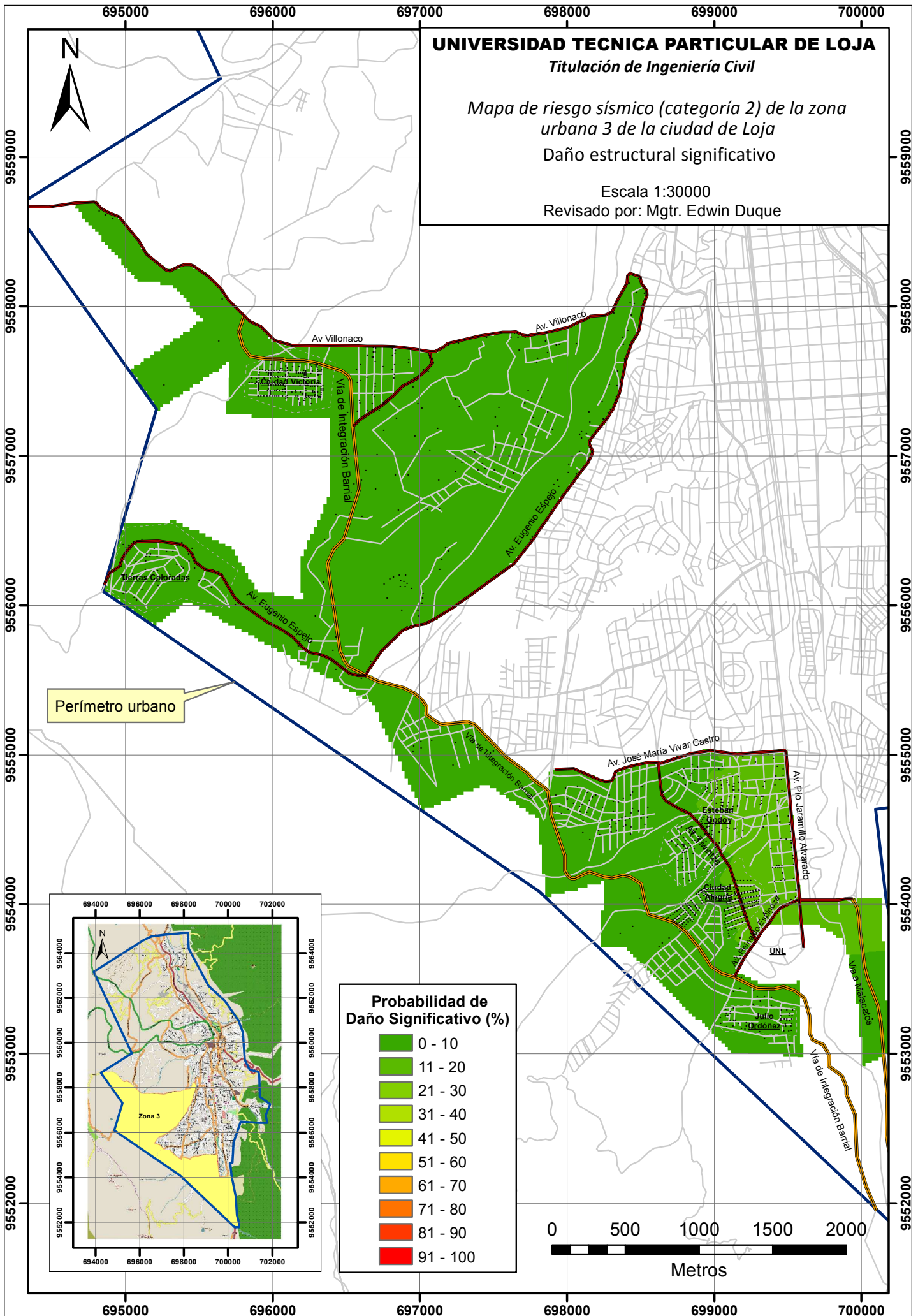


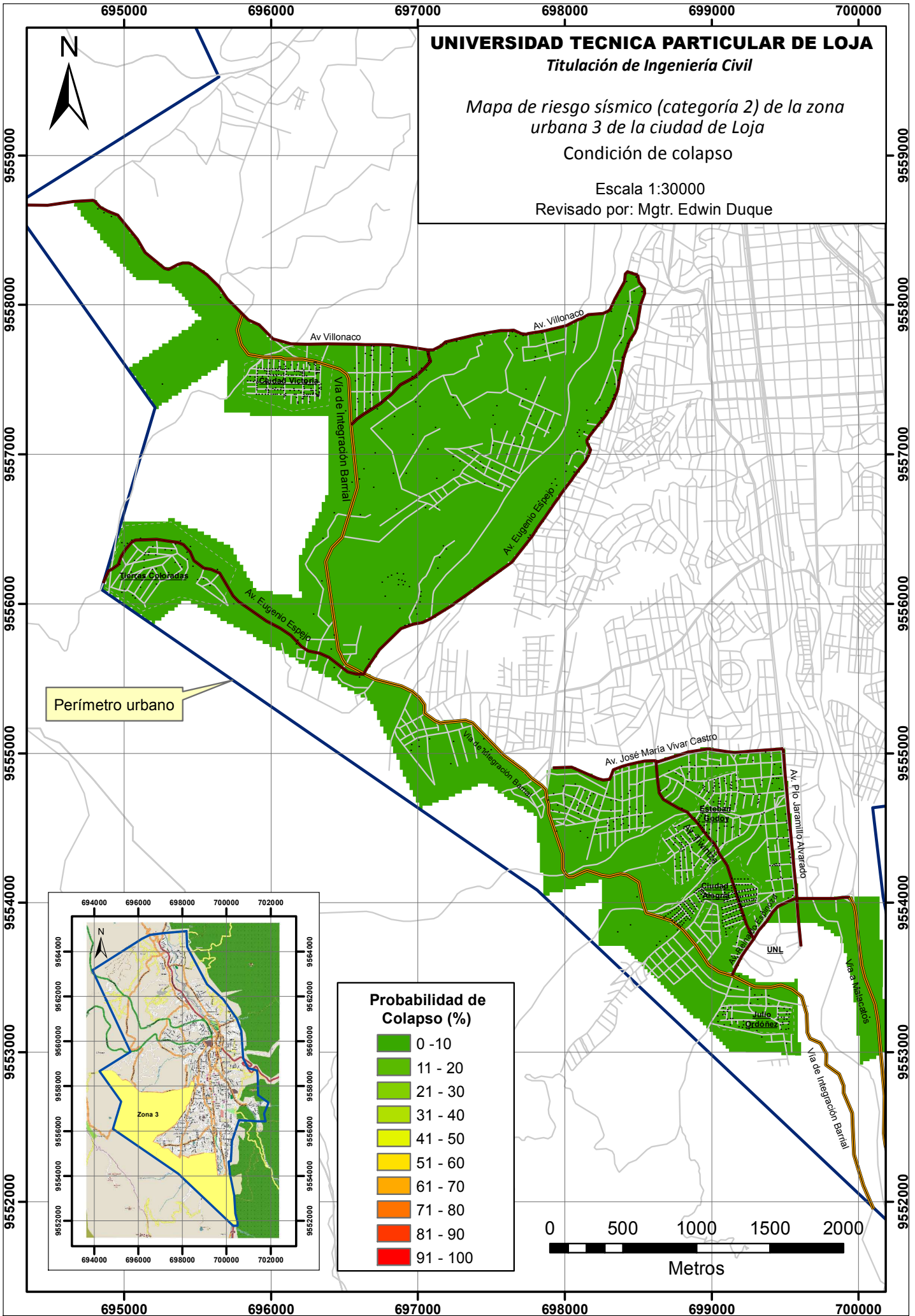
Perímetro urbano



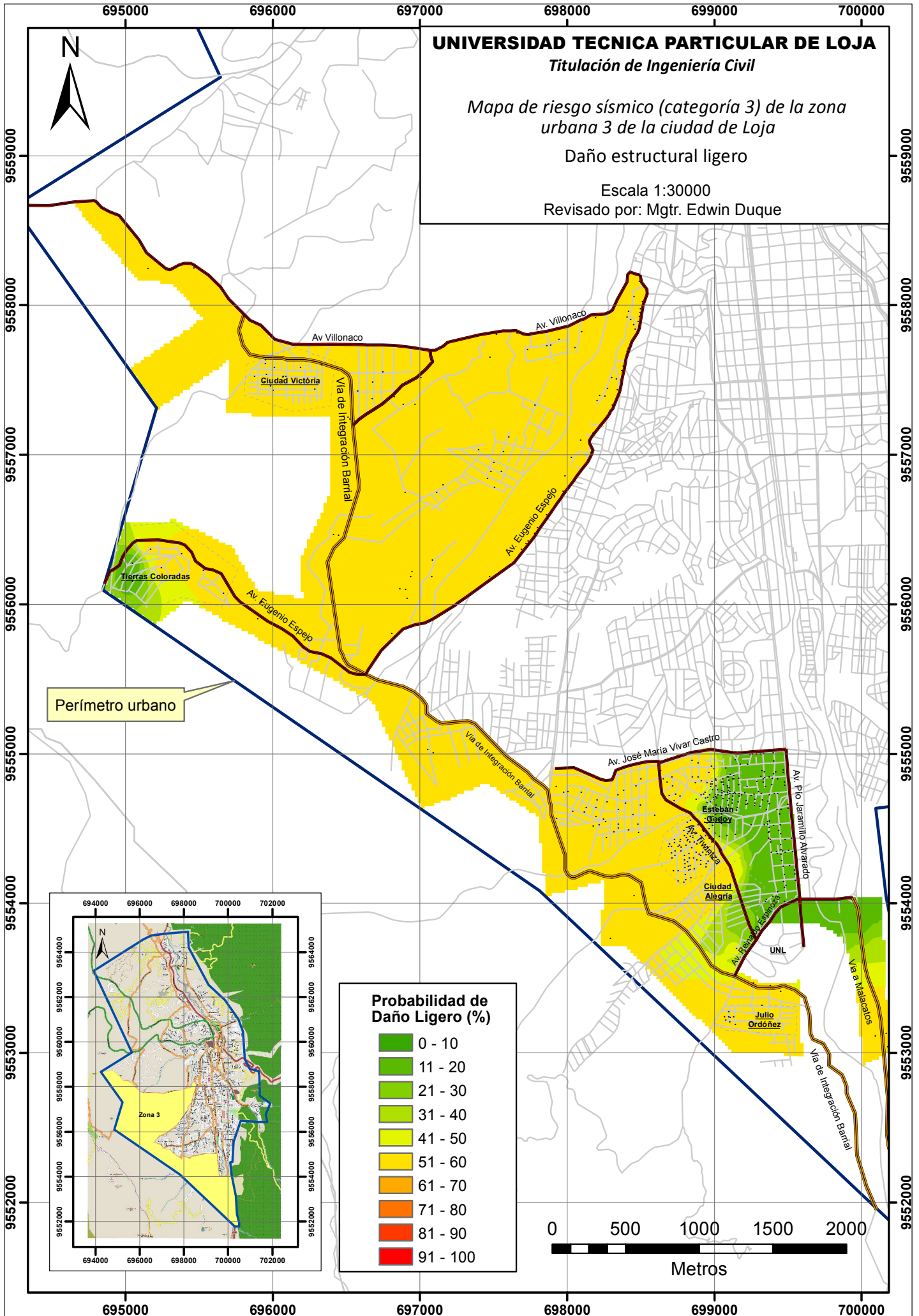
Probabilidad de Daño Ligero (%)

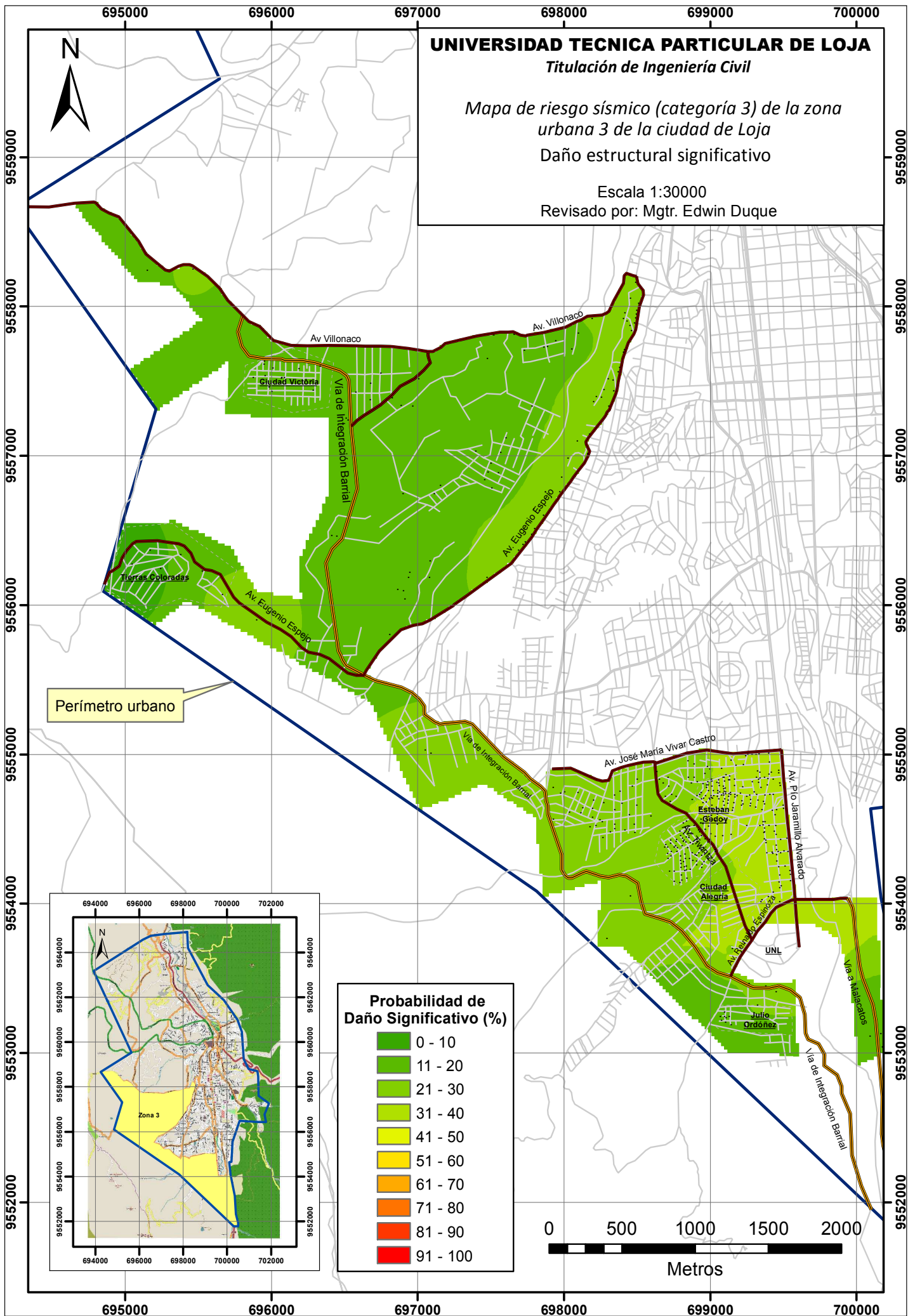


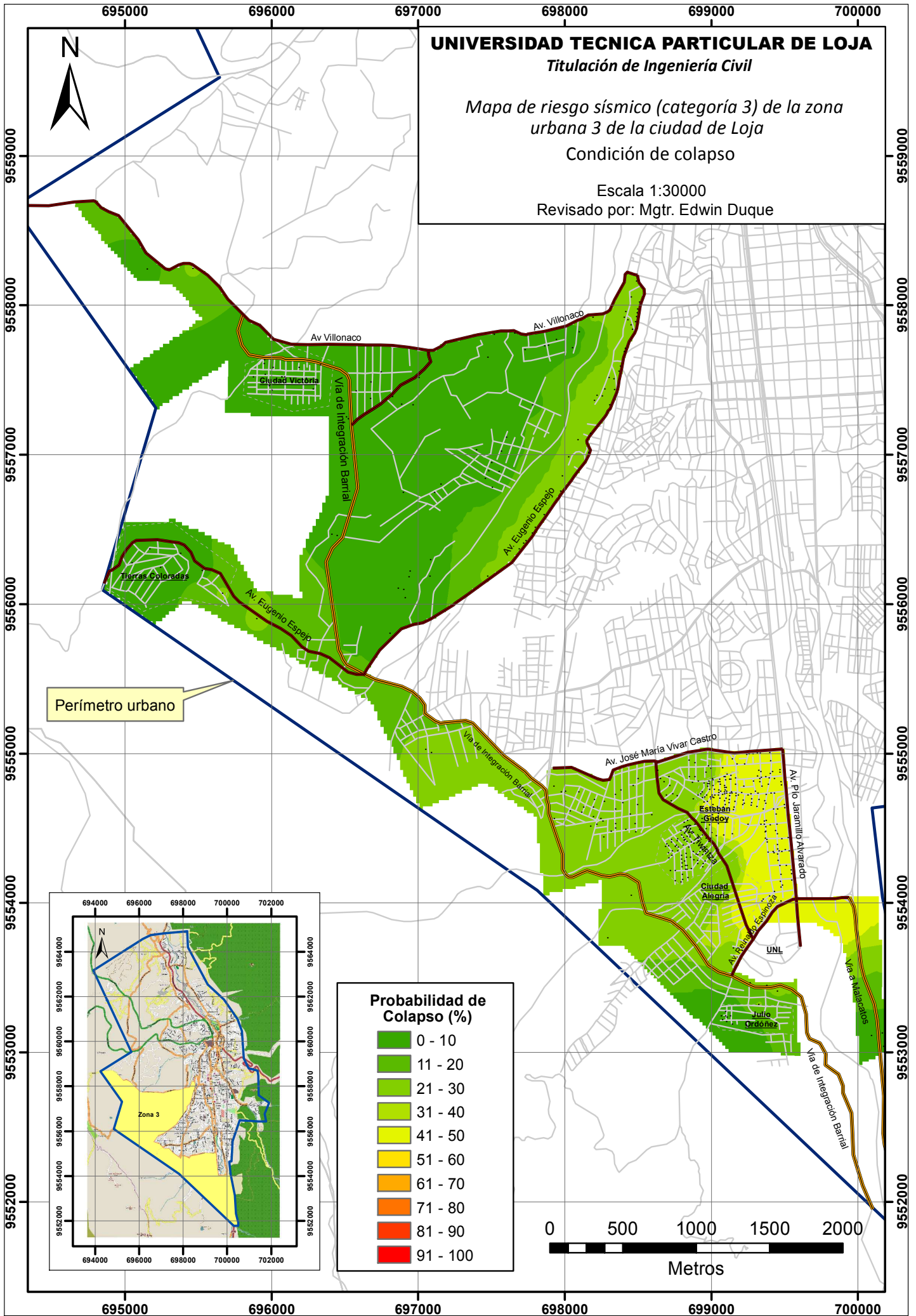




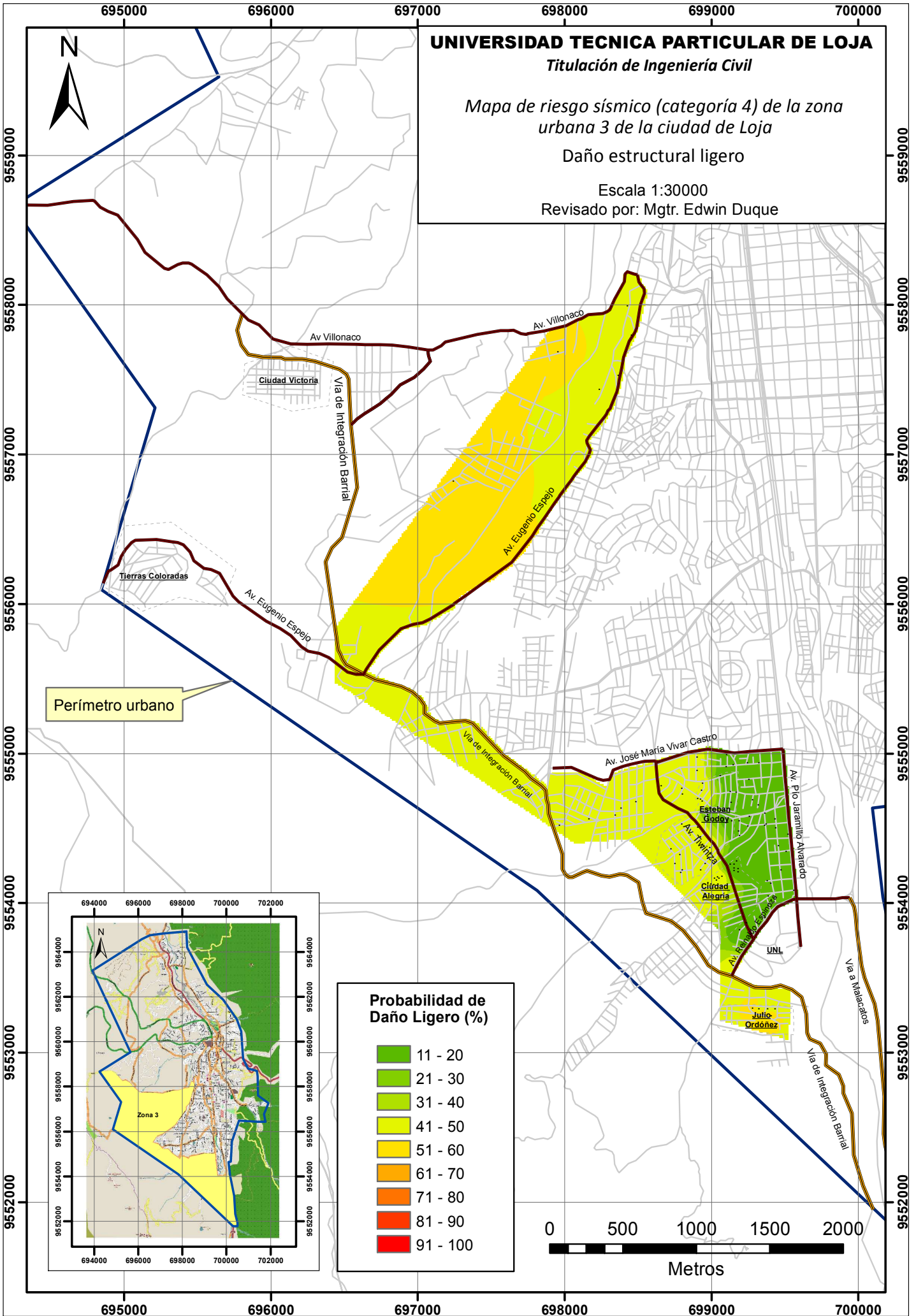
ANEXO F. Mapas de riesgo sísmico – Categoría 3.

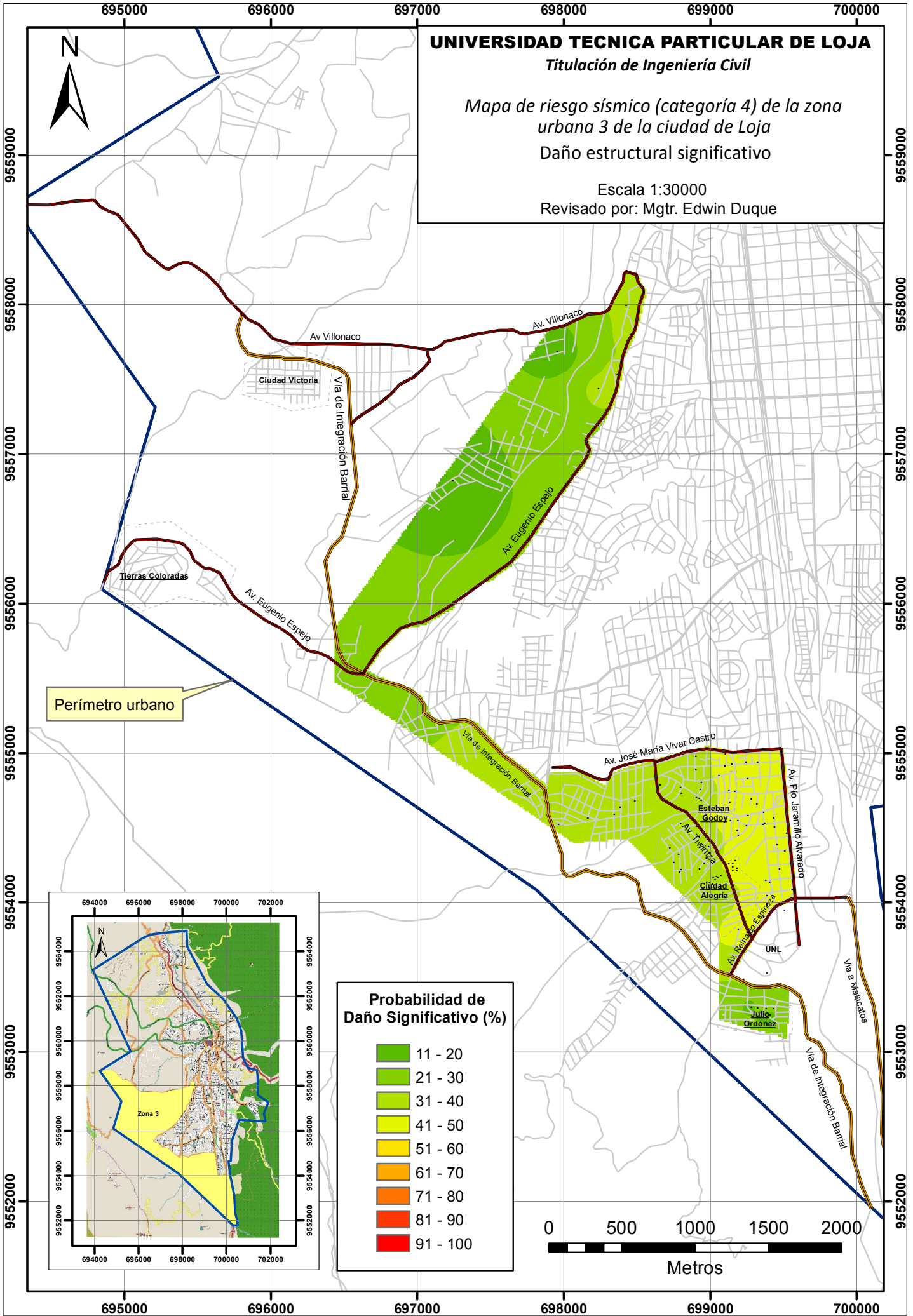


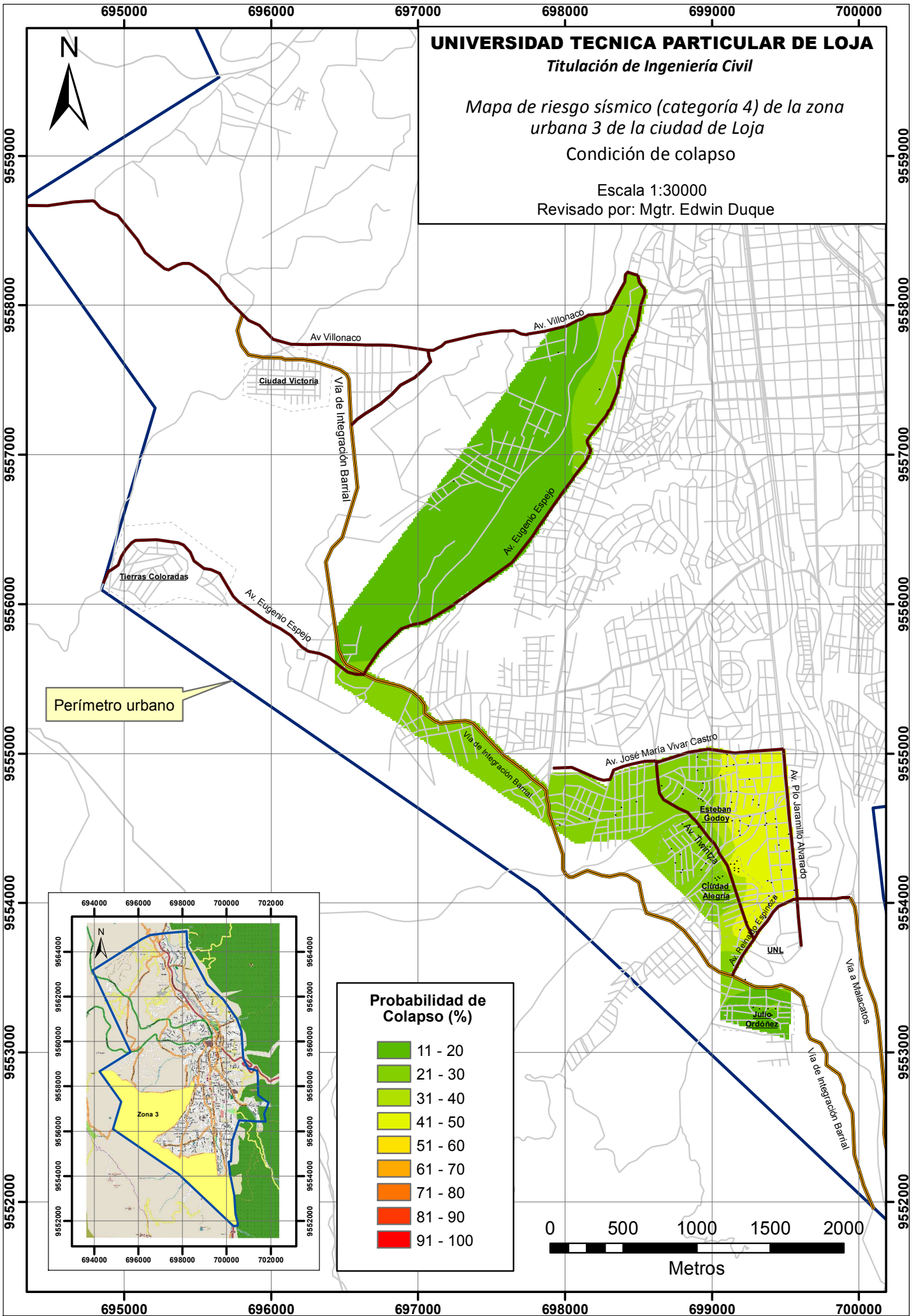




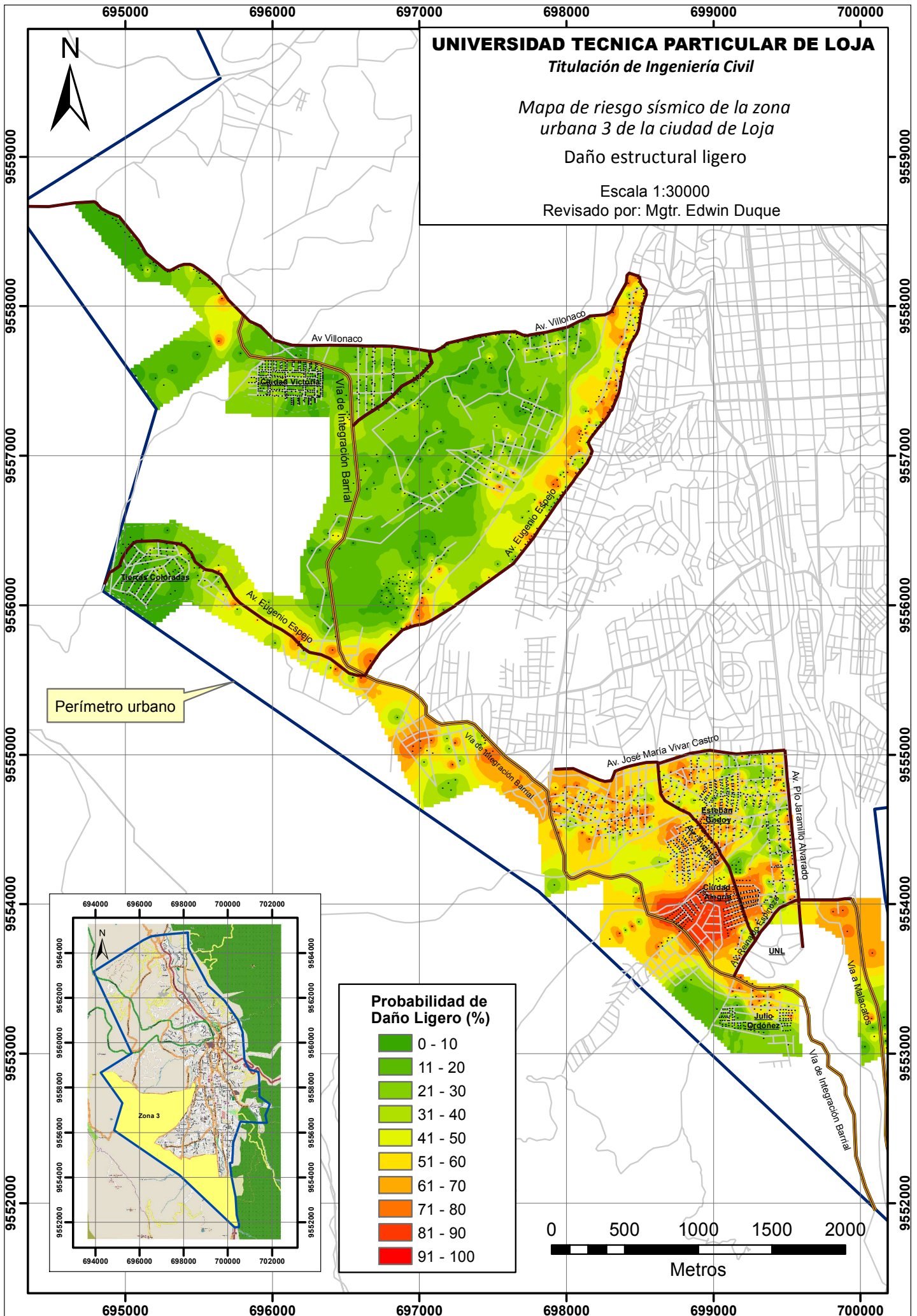
ANEXO G. Mapas de riesgo sísmico – Categoría 4.







ANEXO H. Mapas de riesgo sísmico generales.



UNIVERSIDAD TECNICA PARTICULAR DE LOJA

Titulación de Ingeniería Civil

Mapa de riesgo sísmico de la zona urbana 3 de la ciudad de Loja

Daño estructural ligero

Escala 1:30000

Revisado por: Mgr. Edwin Duque

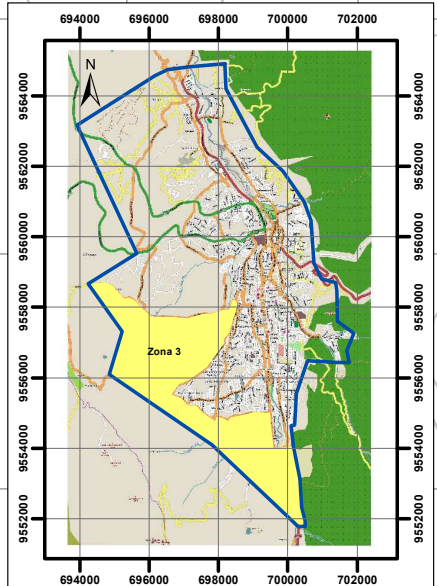
Perímetro urbano

Probabilidad de Daño Ligero (%)

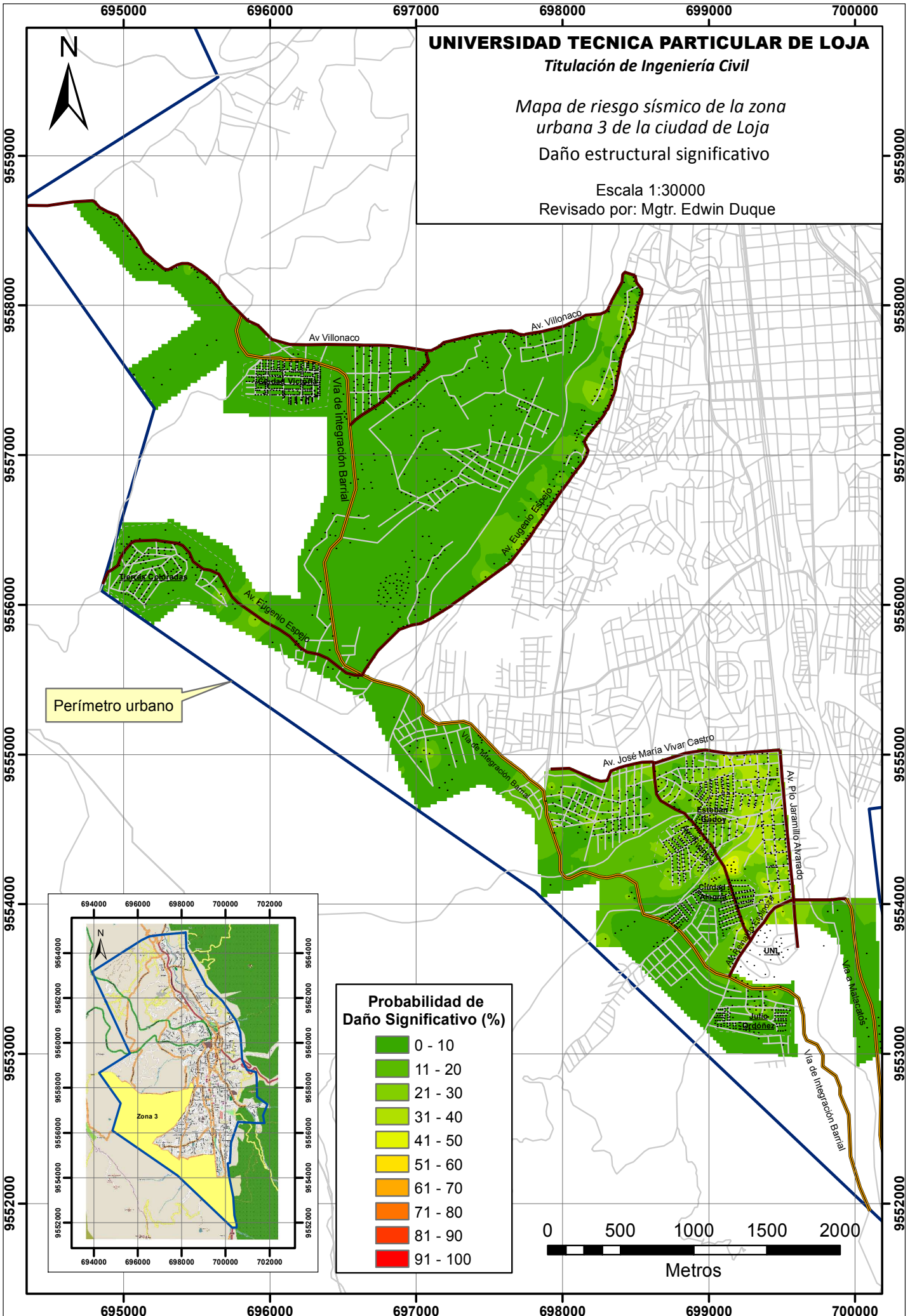
- 0 - 10
- 11 - 20
- 21 - 30
- 31 - 40
- 41 - 50
- 51 - 60
- 61 - 70
- 71 - 80
- 81 - 90
- 91 - 100

0 500 1000 1500 2000

Metros



Zona 3



UNIVERSIDAD TECNICA PARTICULAR DE LOJA

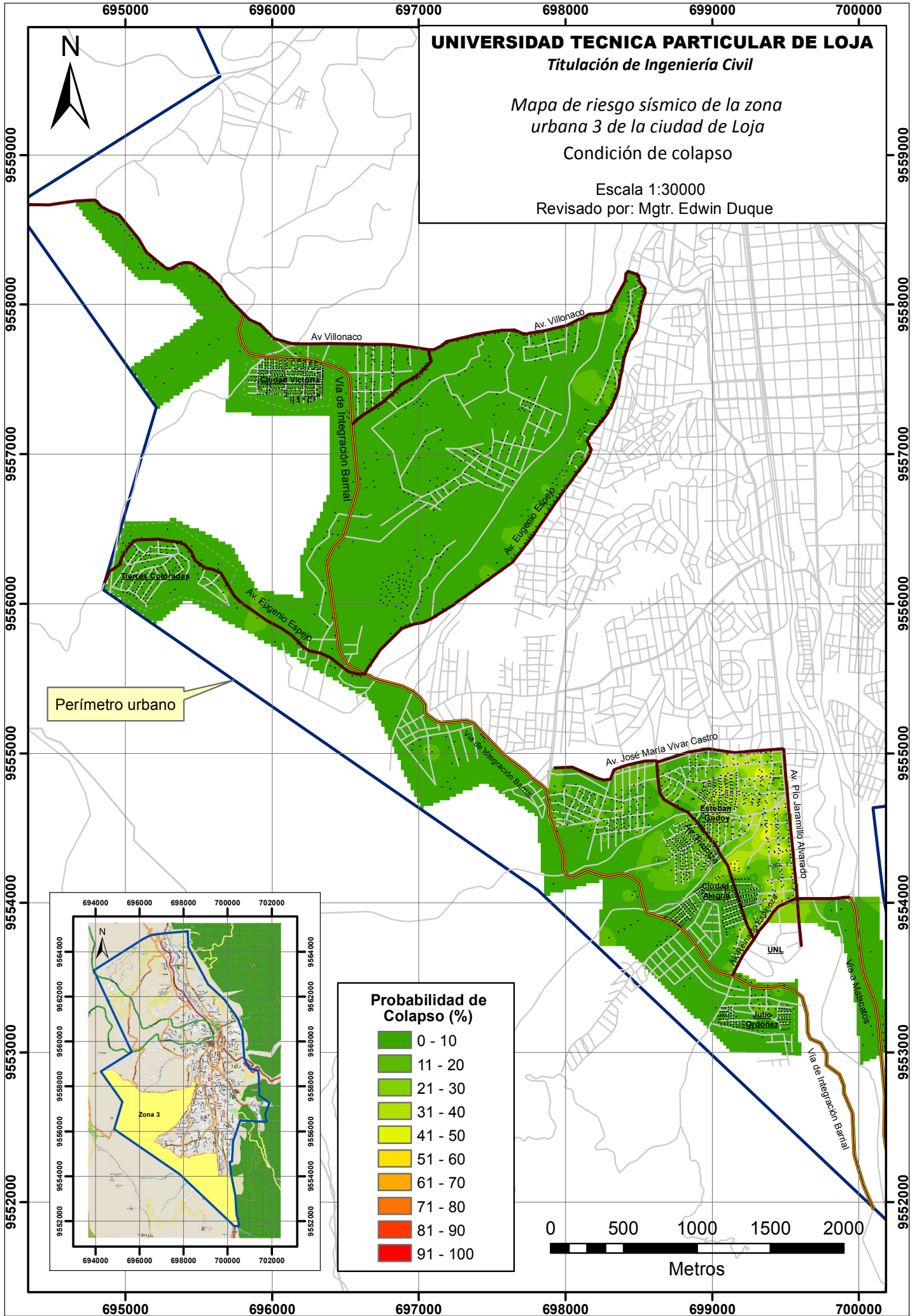
Titulación de Ingeniería Civil

Mapa de riesgo sísmico de la zona urbana 3 de la ciudad de Loja

Condición de colapso

Escala 1:30000

Revisado por: Mgtr. Edwin Duque



Perímetro urbano

