



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA
CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO
AMBIENTE**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO GEÓGRAFO Y DEL MEDIO
AMBIENTE**

**TEMA: ESCENARIOS DE RIESGO SÍSMICO DEL CANTÓN
RUMIÑAHUI DEBIDO A DOS SISMOS PROBABLES CON LA
AYUDA DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA**

AUTOR: ROSERO LÓPEZ DAVID ALIEXIS

TUTOR: DRA. ALICIA RIVAS MEDINA

**SANGOLQUÍ
2016**



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE**

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, **“ESCENARIOS DE RIESGO SÍSMICO DEL CANTÓN RUMIÑAHUI DEBIDO A DOS SISMOS PROBABLES CON LA AYUDA DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA”** realizado por el señor **DAVID ALEXIS ROSERO LÓPEZ**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar al señor **DAVID ALEXIS ROSERO LÓPEZ** para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 12 de febrero de 2016

A handwritten signature in blue ink is located below the text. The signature is fluid and cursive, appearing to read 'Alicia Rivas Medina'. To the right of the signature, there is a faint red rectangular stamp, likely an official seal or verification mark.

Dra. Alicia Rivas Medina

TUTORA



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE**

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **ROSERO LÓPEZ DAVID ALEXIS** con cedula de identidad N° 1716138357, declaro este trabajo de titulación “**ESCENARIOS DE RIESGO SÍSMICO DEL CANTÓN RUMIÑAHUI DEBIDO A DOS SISMOS PROBABLES CON LA AYUDA DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA**”, ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en la cita bibliográfica.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 12 de febrero de 2016

A handwritten signature in blue ink, which appears to read 'David Rosero', is located below the date. The signature is written in a cursive style and is enclosed in a light blue oval shape.

Sr. David Alexis Rosero López

C.C. 1716138357



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE**

AUTORIZACIÓN

Yo, **ROSERO LÓPEZ DAVID ALEXIS**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, publicar en la biblioteca Virtual de la Institución el presente trabajo de titulación “**ESCENARIOS DE RIESGO SÍSMICO DEL CANTÓN RUMIÑAHUI DEBIDO A DOS SISMOS PROBABLES CON LA AYUDA DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA**”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 12 de febrero de 2016

A handwritten signature in blue ink, which appears to read 'David Rosero', is written over a horizontal line.

Sr. David Alexis Rosero López

C.C. 1716138357

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a Dios quien con su infinito amor y sabiduría me ha cuidado a lo largo de la vida bajo su bendición y por ponerme en el camino de personas geniales que han cambiado mi vida de forma positiva.

A mi amada madre Yoli quién supo guiarme por el buen camino, darme fuerzas para seguir adelante y no desmayar ante los problemas, enseñándome a encarar las adversidades con fuerza y valor para nunca perder la batalla.

También por darme, comprensión, amor, y por ayudarme con los recursos necesarios para estudiar. Me has dado mis valores, mis principios, mi carácter, mi empeño, mi perseverancia, y mi coraje para conseguir siempre mis objetivos.

A mi padre, a pesar de nuestra distancia física siento que estás conmigo siempre y aunque nos faltaron muchas cosas por vivir juntos sé que este momento hubiese sido tan especial para ti como lo es para mí.

David R.

AGRADECIMIENTO

A la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, por darme la oportunidad de estudiar y ser un profesional., además de permitirme realizar este trabajo como instancia de investigación en Madrid – España.

Al Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica de la Universidad Politécnica de Madrid por acogerme en sus aulas.

A los Doctores María Belén Benito y Jorge Gaspar por aceptarme en el grupo y dedicarme su tiempo.

A la Dra. Sandra Martínez un especial agradecimiento por llevarme de la mano en el mundo de la vulnerabilidad sísmica y compartir bondadosamente conmigo sus conocimientos.

A la Dra. Alicia Rivas Medina, por ser la mejor tutora que yo pude haber tenido. Quien con sus conocimientos, su experiencia, y su motivación ha logrado en mí ser para mí un referente de ejemplo y admiración.

David R.

ÍNDICE

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 | Definición del problema | 4 |
| 1.2 | Justificación | 5 |
| 1.3 | Antecedentes..... | 6 |
| 1.4 | Objetivos..... | 7 |
| 1.4.1 | Objetivo general | 7 |
| 1.4.2 | Objetivos específicos | 8 |
| 2 | MARCO TEÓRICO..... | 9 |
| 2.1 | El fenómeno natural | 9 |
| 2.2 | Peligrosidad sísmica | 13 |
| 2.2.1 | Metodologías para estimar la peligrosidad sísmica. | 19 |
| 2.2.2 | Metodología empleada en este estudio | 21 |
| 2.3 | Vulnerabilidad Y Riesgo Sísmico | 22 |
| 2.3.1 | Metodología para estudiar la vulnerabilidad y el daño en estructuras . | 24 |
| 2.3.2 | Metodología empleada en este estudio | 27 |
| 2.4 | EL sistema de información geográfica (SIG)..... | 36 |
| 2.4.1 | Los sistemas de información geográfica..... | 36 |
| 2.4.2 | El SIG diseñado en el estudio | 39 |
| 3 | APLICACIÓN AL CANTÓN RUMIÑAHUI | 45 |
| 3.1 | Zona de estudio..... | 45 |
| 3.2 | Escenarios de amenaza sísmica deterministas..... | 47 |
| 3.2.1 | Identificación de los escenarios sísmicos..... | 47 |
| 3.2.2 | Estimación de las aceleraciones máximas esperadas | 54 |
| 3.2.3 | Estimación de las intensidades máximas esperadas..... | 57 |
| 3.2.4 | Resultados | 59 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3.3 | Exposición del cantón Rumiñahui..... | 62 |
| 3.3.1 | Base de datos de partida..... | 62 |
| 3.3.2 | Análisis de la exposición..... | 71 |
| 3.4 | Vulnerabilidad sísmica de las estructuras de Rumiñahui según MIV..... | 77 |
| 3.4.1 | Aplicación de la metodología..... | 77 |
| 3.4.2 | Análisis de la vulnerabilidad..... | 80 |
| 3.5 | Riesgo sísmico del cantón Rumiñahui según MIV para los dos escenarios. | 85 |
| 3.5.1 | Estimación de los escenarios de riesgo | 85 |
| 3.5.2 | Resultados | 86 |
| 4 | CONCLUSIONES | 90 |
| | REFERENCIAS | 92 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Clasificación de los riesgos naturales. Burton y Kates (1964) | 1 |
| Tabla 2. Clasificación geotécnica del suelo según NEC15 | 18 |
| Tabla 3. Factores de amplificación del NEHRP 2009 en función del tipo de suelo y la aceleración pico de entrada..... | 19 |
| Tabla 4. Escala Macrosísmica Europea EMS98 | 20 |
| Tabla 5. Índices de vulnerabilidad propuestas para los edificios de la Matriz de Tipologías (BTM) de RISK-UE (Milutinovic y Trendafiloski, 2003) | 28 |
| Tabla 6. Modificadores de comportamiento del índice de vulnerabilidad VI, para edificios de mampostería no reforzada (Milutinovic y Trendafiloski, 2003)..... | 30 |
| Tabla 7. Modificadores de comportamiento del índice de vulnerabilidad VI, para edificios de hormigón armado (Milutinovic y Trendafiloski, 2003). | 31 |
| Tabla 8. Parámetros del sismo que se emplearán para el Escenario 1 de amenaza. 48 | |
| Tabla 9. Periodos de recurrencia asociados a distintas magnitudes de los segmentos de GFS. Fuente: Rivas-Medina et al. 2014..... | 52 |
| Tabla 10. Parámetros del sismo que se emplearán para el Escenario 2 de amenaza. 52 | |
| Tabla 11. Coeficientes del modelo de Zhao et al. 2006..... | 55 |
| Tabla 12. Clasificación del suelo del modelo de Zhao et al. 2006..... | 56 |
| Tabla 13. Información de partida para cada construcción | 69 |
| Tabla 14. Código asociado a los 8 dígitos del atributo Estructura. | 70 |
| Tabla 15. Significado de pertenencia del código asignado a las estructuras..... | 70 |
| Tabla 16. Composición de la Clave Catastral | 70 |
| Tabla 17. Depuración de construcciones..... | 71 |
| Tabla 18. Tipología asignada. Rumiñahui – Ecuador. Martínez 2015..... | 78 |
| Tabla 19. Modificador Regional. Rumiñahui – Ecuador. Martínez 2015..... | 78 |
| Tabla 20. Modificadores de comportamiento del índice de vulnerabilidad VI, para edificios de mampostería no reforzada. Rumiñahui – Ecuador..... | 79 |
| Tabla 21. Modificadores de comportamiento del índice de vulnerabilidad VI, para edificios de hormigón armado. Rumiñahui – Ecuador..... | 79 |
| Tabla 22. Porcentaje de edificios por tipologías. | 81 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Pérdidas humanas y económicas asociadas a diferentes riesgos naturales a nivel mundial entre 2005 y 2014. UNISRD 2015. | 3 |
| Figura 2. Ciclo sísmico de acumulación y liberación de esfuerzos en una falla..... | 10 |
| Figura3. Mapa de placas tectónicas y la sismicidad registrada a nivel mundial. Fuente: Figuras pacheco sf. | 10 |
| Figura 4. Tectónica regional de la región centroamericana. Sting and Rémi 2006. 11 | |
| Figura 5. Regiones tectónicas asociadas a la zona de subducción. Rojo: Interfase, Azul: Intraplaca y Amarillo: Cortical..... | 12 |
| Figura 6. Variables intervinientes en la estimación de la peligrosidad sísmica..... | 14 |
| Figura 7. Mecanismos de una falla | 15 |
| Figura 8. Geometría y parámetros de la falla..... | 15 |
| Figura 9. Atenuación de la aceleración en función de la distancia y la magnitud. ... | 16 |
| Figura 10. Diagrama metodológico para estimar la peligrosidad sísmica asociada a los dos sismos de estudio..... | 22 |
| Figura 11. Grados de daño de la escala EMS98 para edificios de fábrica..... | 33 |
| Figura 12. Grados de daño de la escala EMS98 para edificios de hormigón armado..... | 34 |
| Figura 13. Función de distribución de probabilidad de beta..... | 35 |
| Figura 14. Distribución de probabilidad beta para cada grado de daño. Esta rampa de color no está bien elegida. | 36 |
| Figura 15. Esquema de las fases de un Sistema de información Geográfica..... | 38 |
| Figura 16. Unidades geográficas mínimas de trabajo que se considerarán en el estudio. | 41 |
| Figura 17. Sistema de referencia geocéntrico WGS84 | 42 |
| Figura 18. Representación geográfica de la proyección UTM. | 43 |
| Figura 19. a) Características de la proyección UTM 17S. b) Características de la proyección TM_E012..... | 44 |
| Figura 20. Crecimiento poblacional. Fuente: PDOT del cantón Rumiñahui | 45 |
| Figura 21. Límites del cantón Rumiñahui..... | 46 |

| | |
|--|----|
| Figura 22. Zonas sísmicas de Ecuador consideradas para definir los dos escenarios | 47 |
| Figura 23. Tamaño del plano de ruptura del Escenario 1 de amenaza en función de la magnitud y las expresiones de Leonard, 2010..... | 49 |
| Figura 24. Plano de ruptura asociado al Escenario 1 de amenaza. | 50 |
| Figura 25. Segmentos de la falla ciega de Quito. Fuente: Rivas-Medina (2014) | 51 |
| Figura 26. Tamaño del plano de ruptura del Escenario 2 de amenaza en función de la magnitud y las expresiones de Leonard 2010..... | 53 |
| Figura 27. Plano de ruptura asociado al Escenario 2 de amenaza. | 54 |
| Figura 28. Diagrama de flujo con la estimación de las aceleraciones esperadas..... | 57 |
| Figura 29. Relación entre la aceleración y la intensidad de Saragoni, 1982..... | 58 |
| Figura 30. Diagrama de flujo desarrollado para obtener las intensidades teóricas... | 58 |
| Figura 31. Mapa de Aceleración PGA (cm/s^2) e Intensidad Macrosísmica. Escenario Extremo..... | 60 |
| Figura 32. Mapa de Aceleración PGA (cm/s^2) e Intensidad Macrosísmica. Escenario Próximo..... | 61 |
| Figura 33. Vista de la información de partida catastral usada para caracterizar la exposición a) formato *.shape, b) formato *.xlsx..... | 62 |
| Figura 34. Modelo conceptual de los datos de partida. En verde oscuro las capas vectoriales y en verde claro las tablas sin representación geográfica. | 63 |
| Figura 35. Distribución geográfica de las zonas urbanas de estudio. | 64 |
| Figura 36. Distribución de sectores por zonas. | 64 |
| Figura 37. Distribución geográfica de los sectores en la zona de estudio. | 65 |
| Figura 38. Distribución de manzanas por zonas. | 66 |
| Figura 39. Distribución geográfica de las manzanas en la zona de estudio..... | 66 |
| Figura 40. Distribución de predios por zonas. | 67 |
| Figura 41. Distribución geográfica de los predios la zona de estudio | 68 |
| Figura 42. Distribución de propiedades horizontales por zonas. | 68 |
| Figura 43. Estado de conservación, número de pisos, condición física y uso topográfico de las edificaciones principales por zona..... | 73 |
| Figura 44. Tipo de mampostería y columnas de las edificaciones principales por zona..... | 73 |

| | |
|--|----|
| Figura 45. Estado de conservación y condición actual de las edificaciones de estudio por sectores..... | 74 |
| Figura 46. Número de pisos y uso topográfico de las edificaciones de estudio por sectores. | 75 |
| Figura 47. Tipo de mampostería y material de las columnas de las edificaciones de estudio por sectores..... | 76 |
| Figura 48. Edificaciones por década por cada zona..... | 77 |
| Figura 49. Diagrama de Flujo: Índice de Vulnerabilidad | 80 |
| Figura 50. Tabulación de las tipologías constructivas por zonas..... | 80 |
| Figura 51. Distribución geográfica de las tipologías constructivas por sectores de la ciudad. | 82 |
| Figura 52. Mapa de Índice de Vulnerabilidad por predios en las zonas urbanas de Rumiñahui. | 84 |
| Figura 53. Flujo de trabajo para obtener la intensidad macrosísmica teórica en cada predio..... | 85 |
| Figura 54. Procesos para obtener las probabilidades de daño..... | 86 |
| Figura 55. Comparación de Escenarios Sísmicos en función del número de edificios con diferente tipo de daño esperado..... | 87 |
| Figura 56. Porcentaje de edificios con los diferentes grados de daño. | 87 |
| Figura 57. Comparación de escenarios mediante zonas. | 88 |
| Figura 58. Mapa de riesgo sísmico. Escenario 1. Tipos de daño..... | 89 |
| Figura 59. Mapa de riesgo sísmico. Escenario 2. Tipos de daño..... | 89 |

RESUMEN

En este trabajo se presentan dos escenarios de riesgo sísmico (en términos de daño esperado en estructuras) en 8 zonas urbanas del cantón Rumiñahui. Para determinar la peligrosidad del cantón se han establecido dos escenarios de amenaza, el escenario 1 de amenaza corresponde con un sismo de gran magnitud y lejano (reproduciendo el terremoto en Esmeraldas en 1906 de magnitud 8.8 y asociado a régimen tectónico de interfase) y el escenario 2 de amenaza corresponde con un sismo de magnitud moderada y próximo al cantón (se ha seleccionado un sismo en el segmento Puengasí de la Falla Ciega de Quito (FCQ), asociándole una magnitud de 6.0). Para ambos escenarios de amenaza se ha empleado el modelo de predicción de movimiento fuerte de Zhao et al. 2006, estableciendo las aceleraciones medias esperadas. Posteriormente, se estimaron las intensidades macrosísmicas equivalentes a dichas aceleraciones con la relación propuesta de en Saragoni 1982. Para caracterizar la exposición y la vulnerabilidad de las estructuras se empleó la base de datos catastral del cantón (actualizada hasta enero de 2015) y la metodología de índice de Vulnerabilidad de Benetti and Petrini 1982. Esta labor se desarrolló en una estancia de investigación en el Grupo de Ingeniería Sísmica de la Universidad Politécnica de Madrid, con la ayuda de la especialista en vulnerabilidad sísmica la Dra. Martínez. Finalmente se obtuvieron dos escenarios de daño ante los dos eventos sísmicos estudiados. Obteniendo mapas con la distribución de los daños en las edificaciones por cada sector de la zonas urbanas de estudio.

PALABRAS CLAVES:

- PELIGROSIDAD
- EXPOSICIÓN
- VULNERABILIDAD
- RIESGO
- MODELO DE MOVIMIENTO FUERTE

ABSTRACT

In this thesis two seismic risk scenarios are presented (in terms of damage expected in structures) in 8 urban areas of Guangzhou Rumiñahui. To determine the dangerousness of Canton has established two scenarios of threat, threat scenario 1 CORRESPOND a major earthquake and far (playing the 1906 Earthquake in Esmeraldas 8.8 magnitude tectonic regime and associated interface) and the stage 2 CORRESPOND threat with an earthquake of moderate magnitude close to Canton (is selected non earthquake in Puengasí segment Blind Fault Quito (FCQ), associating a magnitude of 6.0). For both scenarios of threat has used the model to predict strong movement of Zhao et al. 2006, indicating the expected average acceleration. Subsequently, the equivalent macroseismic intensities estimated a relationship with these accelerations proposal in Saragoni 1982. To characterize exposure and vulnerability of structures soi Employment The cadastral database of Canton (Updated to January 2015) and the methodology of vulnerability index Benetti et travail Petrini 1982. This was developed in a research stay in the group Earthquake Engineering at the Polytechnic University of Madrid, with the help of vulnerability simian specialist Dra. Martinez. Finally they soi obtained two scenarios damage to the two studied seismic events. Obtaining maps with the distribution of damage to buildings by secteur in the urban areas of study

KEYWORDS:

- HAZARD
- EXPOSURE
- VULNERABILITY
- RISK
- STRONG MOTION MODEL

CAPITULO I

1 INTRODUCCIÓN

Los enormes avances tanto científicos como tecnológicos de los últimos años puede dar la impresión de que se consigue un dominio casi total sobre la naturaleza. Claros ejemplos como la modificación de genes (transgénicos, humanos), la exploración del espacio exterior y la explotación de los ecosistemas más remotos del mundo, lo denotan. Pero cuando sucede un terremoto, un volcán entra en erupción o una gran inundación arrasa una zona, se hace presente la grandeza de las fuerzas de la naturaleza que, en pocos minutos, pueden liberar enormes cantidades de energías destructoras de una magnitud abismal. (Echarri 2007).

Los riesgos naturales, entendidos como sucesos extremos de la naturaleza que exceden la capacidad de los procedimientos humanos para absorberlos o amortiguarlos (Calvo 1984), pueden ser clasificados atendiendo a su origen, sus causas, sus efectos o a las características que presentan. Una clasificación muy sencilla, expuesta por Burton and Kates (1964), diferencia los riesgos de acuerdo a su origen (geofísico o biológico) y al principal agente causal, tal y como muestra la Tabla 1.

Tabla 1.

Clasificación de los riesgos naturales. Burton y Kates (1964)

| GEOFÍSICOS | | BIOLÓGICOS | |
|-----------------------------|------------------------------|--|---|
| Climáticos y Meteorológicos | Geológicos y Geomorfológicos | Florales | Fáunicos |
| Ventiscas y nieve | Aludes | Enfermedades producidas por hongos (Pié de atleta, Roya ...) | Enfermedades bacterianas y producidas por virus (Gripe, Malaria...) |
| Sequías | Terremotos | Plagas (Mala hierba, Freatofitas) | Enfermedades venéreas (Rabia) |
| Inundaciones | Erosión | | Plagas (Conejos, Termitas ...) |
| Nieblas | Desprendimientos de tierras | | Fiebre del heno |
| Heladas | Arenas movedizas | | Hiedra tóxica |
| Pedrisco | Tsunamis | | Mordiscos de animales venenosos |
| Olas de calor | Erupciones volcánicas | | |
| Huracanes | | | |
| Rayos | | | |
| Tornados | | | |

Independientemente de su origen, todos ellos tienen un denominador común cuando se presentan en la naturaleza en magnitudes extraordinarias, el gran número de pérdidas humanas y económicas que ocasionan a nivel mundial.

Algunos de los eventos catastróficos más destacados en los últimos años, como el Tsunami de Sumatra en 2004, con 242.829 víctimas mortales, el terremoto de Haití en 2010, con 222.570 víctimas mortales o la ola de calor de Rusia en 2010, que generó numerosos incendios donde perdieron la vida 55.736 personas, muestran claramente que la humanidad no siempre está preparada para afrontar el poder devastador de la naturaleza.

Si se analizan las estadísticas presentadas por la Oficina de Reducción de Riesgos de Naciones Unidas (*The United Nations office for Disaster Risk Reduction UNISDR*

2015) (Figura 1), puede observarse que los dos riesgos naturales que más afectan a la población mundial son las inundaciones, por su gran recurrencia, y los terremotos, por el gran número de pérdidas (tanto económicas como humanas) que lleva asociado cada evento individual.

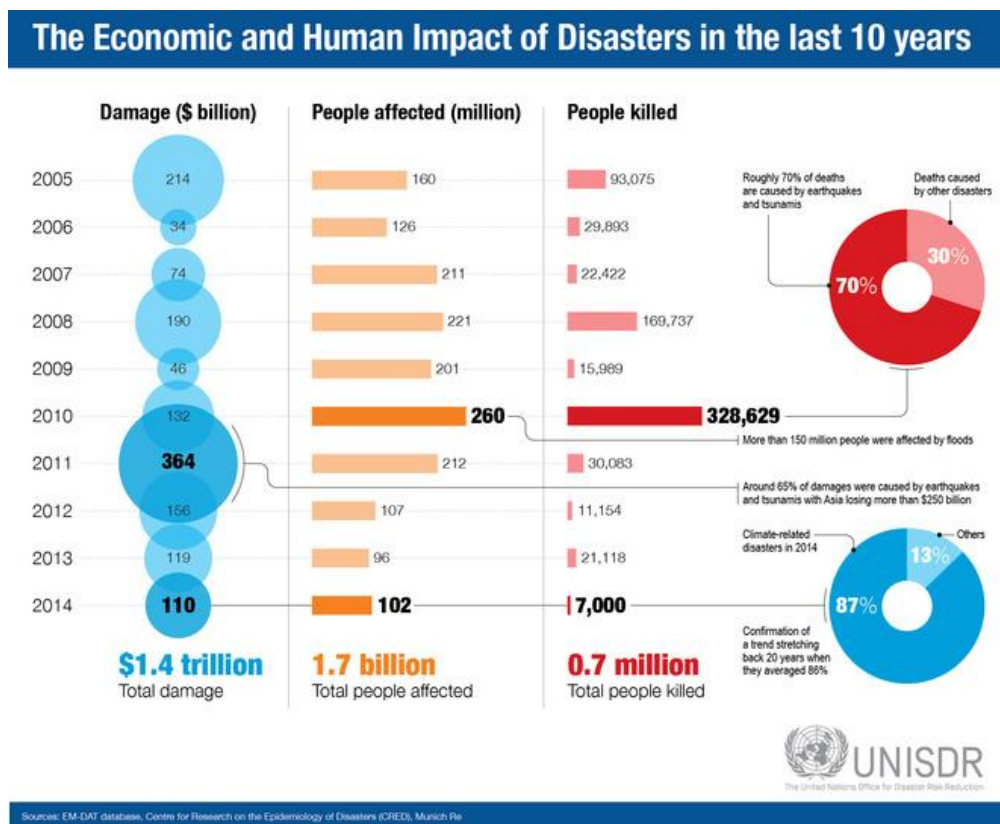


Figura 1. Pérdidas humanas y económicas asociadas a diferentes riesgos naturales a nivel mundial entre 2005 y 2014. UNISRD 2015.

El riesgo sísmico es uno de los que más vidas tiene asociadas, siendo este el motivo por el que sigue siendo un riesgo muy importante, así lo indica los estudios realizados por UNISDR, 2009, donde se muestra la comparación en la distribución anual del impacto humano atendiendo a los diferentes tipos de desastre.

Un claro ejemplo de la incidencia que tiene el riesgo sísmico a nivel mundial son los resultados del 2008 generados por Naciones Unidas (UNISDR 2008), donde se puede comparar diferentes riesgos tales como: incendios, volcanes, inundaciones y terremotos. Los dos últimos fenómenos superan con un gran margen de diferencia a los primeros, ya que para incendios se registra un promedio de afectación de 258 personas, volcanes con 126 personas pero para inundaciones son más de 42.911

personas y no muy lejos los terremotos con un valor de 47.223 personas, eso sin contar con las cifras del total de muertos que superan las 87.000 personas (solo en terremotos).

Para poder afrontar cualquier riesgo natural, y el riesgo sísmico en particular, las sociedades desarrollan medidas de mitigación que ayuden en la gestión de dichos riesgos. Pero para ello, antes se debe evaluar y estudiar las particularidades naturales asociadas al mismo y sus efectos en la población.

El riesgo debe ser entendido como toda fuente de peligro que puede causar daños y la probabilidad de que dichos daños se produzcan. Por este motivo, el riesgo no depende sólo de la peligrosidad de un fenómeno; también influye la exposición, es decir, la cantidad de personas y bienes materiales que pueden sufrir el acontecimiento peligroso y la vulnerabilidad de los mismos.

$$\text{Riesgo} = \text{Peligrosidad (o amenaza)} * \text{Exposición} * \text{Vulnerabilidad}$$

Naciones Unidas en el documento “Vivir con el Riesgo: Informe mundial, ONU 2004” plantea que el grado de conocimiento del “riesgo” depende en gran medida de la cantidad y calidad de la información disponible y de las distintas maneras en que las personas perciben el peligro. La gente es más vulnerable cuando no tiene conciencia de las amenazas que ponen en peligro su vida y sus bienes. La percepción del “riesgo” varía según la sensibilidad de cada persona, comunidad o gobierno. Tener conocimiento de las amenazas y de la vulnerabilidad, así como disponer de información precisa y oportuna al respecto puede influir en esta percepción y disminuir las pérdidas de vida, económicas, medio ambientales y patrimoniales.

1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El Ecuador posee una historia contundente de actividad sísmica que “en los últimos 460 años, provocó la destrucción de ciudades enteras como Riobamba en 1797 o Ibarra en 1868 y la muerte de más de 60.000 personas por causa de terremotos” (Yépez et al. 2015). A pesar de esto, no existe en el país una conciencia

real acerca del peligro sísmico que pesa sobre él. Si bien el país cuenta con un código sísmico cuya última actualización se muestra en NEC15, las edificaciones anteriores a la implementación de los códigos, los aumentos puntuales de las edificaciones en lugares concretos junto a las malas prácticas constructivas (Roldós 2012) hace que la vulnerabilidad de las edificaciones, y por lo tanto el riesgo de la población, sea mayor de lo que cabría esperar, generando una incertidumbre importante sobre el riesgo sísmico concreto de la zona y las consecuencias económicas y humanas de dicho riesgo.

Para diseñar de forma efectiva planes de emergencia y definir medidas correctoras que ayuden a controlar y reducir el riesgo existente, es esencial disponer de estimaciones de riesgo sísmico sobre las cuales realizar una correcta identificación de aquellas áreas críticas que requerirán mayor atención. Dichas estimaciones pueden ayudar a avanzar, de forma más efectiva, en la mitigación del riesgo y en la creación de planes de emergencia y, de ese modo, reducir las pérdidas que puede ocasionar un fenómeno sísmico, tanto desde el punto de vista físico, como social y económico.

1.2 JUSTIFICACIÓN

El cantón Rumiñahui aumentó su número de edificaciones de manera significativa en los últimos años (a partir del año 2002 el cantón aumentó un 232.98% el número de edificaciones en relación a lo que existía hasta 1999, GADMUR 2012), lo que conlleva inevitablemente a un aumento de la exposición y, por lo tanto, del riesgo a diferentes tipos de amenazas, tanto naturales como antrópicas. Es importante desarrollar estudios de riesgo (en este caso del riesgo sísmico) para cuantificar esta variable y evaluar la seguridad de la población del cantón.

La alta peligrosidad sísmica del país, debido a la tectónica regional, hace que el riesgo sísmico sea uno de los riesgos más importantes a tener en cuenta dentro de la protección de la ciudadanía.

1.3 ANTECEDENTES

Los estudios de riesgo sísmico evolucionaron mucho en las últimas décadas, el empleo de grandes bases de datos georreferencias dentro de estos estudios es hoy en día una práctica usual gracias al uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), cuyo empleo no solo permite almacenar y gestionar grandes geodatabases, también permite clasificar y analizar la información de estudio como las bases de datos catastrales que caracterizan la exposición y la modelización del movimiento o intensidad esperada por eventos sísmicos concretos.

La caracterización del riesgo sísmico en las últimas décadas fue adquiriendo una mayor especificidad, pasando de metodologías empíricas cualitativas ordenadas como MSK-76 (Medvedev 1977), ATC-13 (ATC 1985), EMS98, hasta metodologías más complejas como en método analítico de capacidad-demanda donde se asignan curvas de capacidad y fragilidad a las estructuras por medio de análisis *Pushover* (Hazus (Fema-440 2005), Risk-UE 2003, Mouroux et al. 2004, Lagomarsino and Giovinazzi 2006). En la misma línea, otras metodologías fueron desarrolladas y ampliamente utilizadas por la comunidad científica siguiendo otras líneas metodológicas, un ejemplo de ellas es el Método de Índice de Vulnerabilidad (MIv) (Benedetti and Petrini 1984), esta metodología tiene un grado de especificidad mayor que el de las metodologías cualitativas ordenadas y está desarrollada para incluir correctores de vulnerabilidad referidos a la geometría y análisis de la distribución espacial relativa de las edificaciones en el territorio, lo que permite su implementación a partir del análisis espacial de la exposición en el territorio por medio de un Sistema de información geográfica SIG.

Son muchos los trabajos científicos en los que se identifica el papel de los SIG en la estimación tanto del riesgo sísmico como de las variables que lo componen (amenaza, vulnerabilidad y exposición) entre ellos cabe destacar Cova and Church 1997, Mejía-Navarro et al. 1994, Wood et al. 2004, Codermatz et al. 2003, Rivas-Medina et al. 2010, 2013, en este último trabajo se realiza una descripción muy detallada del papel de los SIG dentro de un estudio de riesgo sísmico a escala urbana, caso que nos ocupa. Otra referencia importante la encontramos en la tesis doctoral de Lantada 2007, donde la autora realiza una evaluación del riesgo sísmico en la ciudad

de Barcelona mediante métodos avanzados y técnicas GIS, utilizando entre otros el Método de Índice de Vulnerabilidad.

En cuanto a los antecedentes relacionados con estudios previos desarrollados en la zona de estudio, no se encontró estudios completos de riesgo sísmico desarrollados para todo el cantón Rumiñahui usando una metodología específica de este riesgo. Cabe destacar la tesis de pregrado de Barahona de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE (Barona 2010) donde se desarrolla un estudio de vulnerabilidad sísmica del centro histórico de Sangolquí (aproximadamente 10 manzanas).

Otro estudio importante desarrollado en una parte de la zona de estudio es el publicado en Tibanlombo and Villacís 2013, este trabajo corresponde con un estudio de vulnerabilidad de la parroquia de Sangolquí asociada a diferentes riesgos (sísmico, volcánico, de deslizamientos e inundaciones), la metodología empleada en este caso es la propuesta por la Secretaria Nacional de Riesgos en colaboración con el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo en el año 2013. Esta metodología, enfocada para estudios multirriesgos, determina la vulnerabilidad de las estructuras siguiendo una clasificación cualitativa ordenada, estableciendo finalmente tres tipos de vulnerabilidad (alta, media y baja).

A parte de estos dos estudios, no se encontró ningún otro estudio publicado en el que se haga referencia al riesgo sísmico en el cantón Rumiñahui, en ningún caso abarca la zona de estudio completa y estima el riesgo sísmico con una metodología específicamente para este riesgo. Si bien, todos estos trabajos son un punto de partida importante para el desarrollo de este trabajo, los mismos no son completos.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general

Evaluar el riesgo sísmico del cantón Rumiñahui calculando escenarios de riesgo asociados a dos eventos probables, un sismo próximo (de cortical y magnitud moderada) y un sismo lejano (de subducción interfase y alta magnitud), empleando una metodología específica de este riesgo y con la ayuda de un Sistema de Información Geográfica.

1.4.2 Objetivos específicos

- Identificación de dos escenarios sísmicos probables que puedan generar un potencial riesgo para el cantón Rumiñahui y caracterizar las fuentes sísmicas.
- Caracterización de la acción sísmica de los dos eventos probables en el cantón Rumiñahui mediante el empleo de ecuaciones de predicción del movimiento fuerte, en términos de aceleración e intensidad teórica esperada.
- Caracterizar la exposición del cantón Rumiñahui a partir de la base de datos catastral usando un SIG.
- Caracterización de la vulnerabilidad sísmica del cantón Rumiñahui según el Método de Índice de Vulnerabilidad MIV (Benedetti and Petrini 1984) usando un SIG.
- Estimación del riesgo sísmico asociado a los dos eventos en el cantón Rumiñahui en términos de daño esperado para los dos escenarios de amenaza.

CAPÍTULO II

2 MARCO TEÓRICO

2.1 EL FENÓMENO NATURAL

Un terremoto o sismo es una liberación brusca de energía que se genera en la corteza terrestre debido a la acumulación continua de esfuerzos asociadas a grandes fuerzas tectónicas. La naturaleza semirrígida de la corteza terrestre hace que ésta sea capaz de amortiguar una parte de dichos esfuerzos pero, una vez superado su coeficiente de rigidez, estos esfuerzos son liberados bruscamente en pocos segundos en las zonas más frágiles de la corteza terrestre.

De acuerdo a la teoría del rebote elástico (Reid 1910), la generación de un sismo lleva asociado una cadena de procesos, mediante la cual se establece una fase previa de acumulación de esfuerzos que puede durar muchos años (dependiendo del valor de las fuerzas actuantes), posteriormente, esos esfuerzos son liberados súbitamente en pocos minutos hasta llegar a un estado de esfuerzos casi nulo. Puesto que las fuerzas tectónicas siguen actuando, después de la ocurrencia del terremoto, las fuerzas seguirán haciéndolo de la misma manera en que lo hicieron en la primera fase, acumulando nuevamente esfuerzos hasta que estos vuelvan a ser liberados súbitamente. Eso significa que la acumulación y liberación de energía sigue un proceso cíclico, pudiendo ser este estudiado y caracterizado (Figura 2). Al tiempo transcurrido entre eventos, tiempo de acumulación de esfuerzos, se lo denomina Tiempo de Recurrencia, y la magnitud o tamaño de los terremotos que se generen dependerán de ese tiempo, del tamaño del área en el que se acumulan dichos esfuerzos y del valor de las fuerzas que los generan.

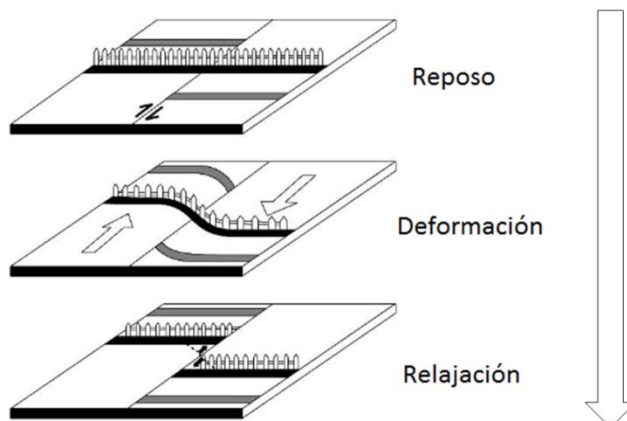


Figura 2. Ciclo sísmico de acumulación y liberación de esfuerzos en una falla.

Debido a la relación que existe entre las fuerzas que producen la acumulación de esfuerzos y la tectónica del planeta, los terremotos se localizan en los límites de placas y zonas adyacentes en dichos límites, generando en algunos casos amplias zonas de amortiguamiento (Figura 3).

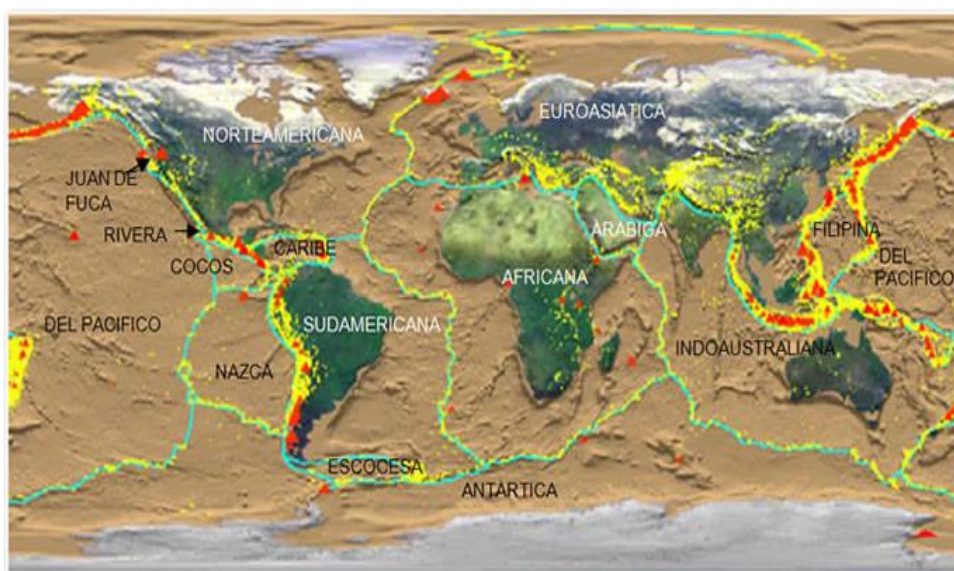


Figura 3. Mapa de placas tectónicas y la sismicidad registrada a nivel mundial. Fuente: Figuras pacheco sf.

De todas las zonas sísmicas identificadas en la Figura 3, el cinturón de fuego circunpácifico, delimitado por la amplia zona de subducción de la placa Pacífica y de Nazca, aglutina el 90% de la actividad sísmica a nivel mundial, generando los

mayores sismos que se registraron (en época instrumental) en todo el planeta, como el sismo de Chile en 1960, de magnitud 9.5 (máxima registrada en el mundo) o el sismo de Japón en 2011, de magnitud 9.1. Además del gran riesgo que supone para la población este tipo de terremotos, estos sismos suelen llevar asociados el riesgo de generar tsunamis.

Ecuador, se encuentra en pleno cinturón de fuego, donde interactúan tres placas tectónicas: la placa oceánica de Nazca, la Placa continental Sudamericana y el Bloque Norandino (Figura 4). En este ambiente, y debido a la colisión y subducción de la placa oceánica bajo las dos placas continentales, a una velocidad de 65mm/año, se identifican varias fuentes sísmicas: la primera relacionada con el fenómeno de subducción propiamente dicho, la segunda relacionada con la deformación y movimiento relativo de las dos placas continentales debido al choque con la placa oceánica, ambas de carácter superficial y la tercera, asociada a una deformación en la placa oceánica subducida y de carácter profundo. (Segovia and Alvarado 2009)

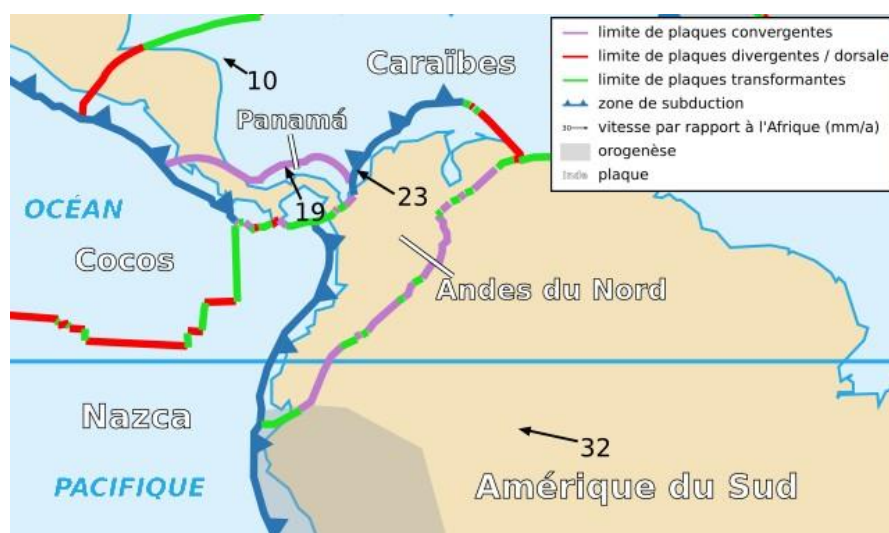


Figura 4. Tectónica regional de la región centroamericana. Sting and Rémi 2006.

Por lo tanto, los sismos tectónicos que se pueden desarrollar en esta región tienen 3 naturalezas distintas:

- **Sismos de subducción interfase**, que se generan en la zona más superficial de la subducción (con una profundidad máxima de entre 40 y 60 km) y que generan terremotos de gran magnitud acompañados en muchos casos de tsunamis.

- **Sismos de subducción intraplaca**, que se generan en la zona de subducción más profunda, donde los sismos suelen alcanzar también magnitudes grandes (aunque no tan altas como en interfase). Estos sismos, pese a su magnitud elevada, no suelen presentar un gran riesgo para la población, ya que su hipocentro suele estar a gran profundidad y, por lo tanto, lejos de los núcleos de población.
- **Sismos de Cortical**, que se generan en las fracturas de la corteza de la placa continental. Estos sismos, al generarse en fallas dentro de la corteza, no suelen alcanzar grandes magnitudes, pero, en contraposición de los anteriores, pueden ubicarse muy cerca de las poblaciones, generando un gran riesgo.

En la Figura 5 se muestran las zonas sísmicas de Ecuador asociadas a los tres regímenes tectónicos antes enumerados.

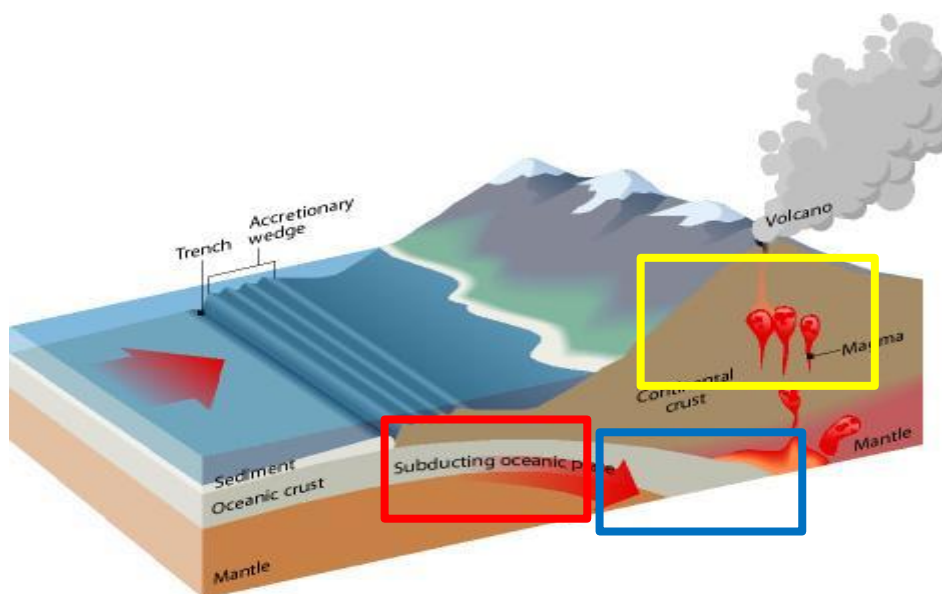


Figura 5. Regiones tectónicas asociadas a la zona de subducción. Rojo: Interfase, Azul: Intraplaca y Amarillo: Cortical.

En este contexto, puede observarse que Ecuador es un país con gran actividad sísmica. Si se analiza el archivo histórico, puede observarse que esta gran amenaza sísmica se materializó a lo largo del último siglo por medio de la ocurrencia de numerosos terremotos destructivos, entre los que se puede citar el terremoto de Esmeraldas de 1906 ($M_w=8.8$, uno de los más grandes registrados en el mundo),

Ambato de 1949 (M=6.8) que dejó cerca de 5050 fallecidos, Reventador en 1987 (Mw=6.1 y 6.9) que provocó deslizamientos de lodo y avalanchas de rocas destruyendo parte del oleoducto ecuatoriano causando un gran impacto en la economía del país, Bahía de Caráquez en 1998 (Mw=7.2) que afectó cerca del 60% de las edificaciones de la zona (Ortiz 2015).

2.2 PELIGROSIDAD SÍSMICA

La peligrosidad o amenaza sísmica se define como la probabilidad de excedencia de un cierto valor de la intensidad del movimiento del suelo producido por terremotos, en un determinado emplazamiento y durante un periodo de tiempo dado. La definición comúnmente aceptada fue dada por la UNDRO (1980), según la cual la peligrosidad H (de *Hazard*) se representa por medio de una función de probabilidad del parámetro indicativo de la intensidad de movimiento x , en un emplazamiento s , mediante la ecuación [1].

$$H = P[x(s) > X_0, t] \quad [1]$$

Donde P representa entonces la probabilidad de superación de un valor umbral x_0 del parámetro elegido durante un tiempo t .

La peligrosidad sísmica es una característica innata del terreno y no es posible evitarla o reducirla, tan solo estimarla.

Para poder estimar la peligrosidad sísmica, antes es necesario caracterizar las variables intervinientes en esta amenaza, siendo estas: la fuente sísmica, trayectoria o propagación de la onda sísmica por el terreno y el efecto de sitio (Figura 6).

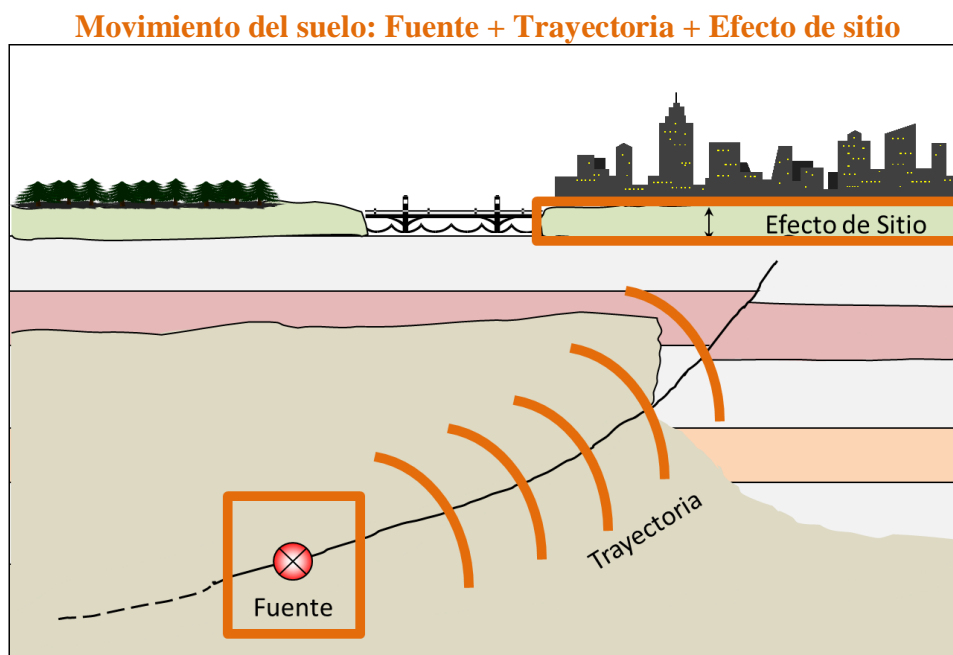


Figura 6. Variables intervinientes en la estimación de la peligrosidad sísmica

Caracterización de la fuente sísmica

La caracterización de la fuente sísmica es la determinación y localización de las fuentes potencialmente activas que afectan el área de estudio. Para ello se emplean modelos matemáticos que indica el comportamiento que esta tiene o puede tener de acuerdo a como ya lo ha hecho en el pasado.

La estructura generadora de terremotos es una falla, lo que se entiende como una ruptura en la corteza terrestre debida a la acumulación de esfuerzos generados por las fuerzas tectónicas.

De acuerdo al sentido de las fuerzas tectónicas que afectan a la falla, estas pueden clasificarse como: fallas normales o inversas, cuando las fuerzas tienen un sentido divergentes o convergente respectivamente, generando un desplazamiento relativo de los bloques de la falla perpendiculares a la traza, y fallas de desgarre, cuando las fuerzas generan un desplazamiento de los bloques paralelo a la traza. (Figura 7).

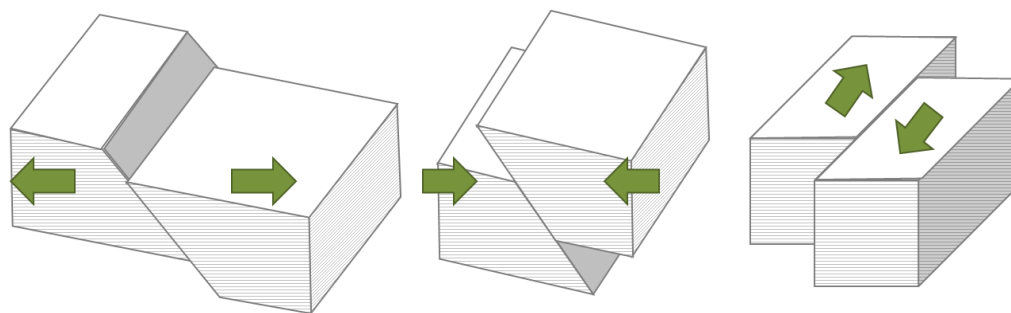


Figura 7. Mecanismos de una falla

La geometría de una falla, queda definida por tres direcciones fundamentales: el acimut de la traza de la falla, que indica la orientación de la misma con respecto al norte geográfico, el buzamiento, que indica el ángulo de inclinación del plano de falla con respecto a la horizontal y la dirección del desplazamiento (Figura 8).

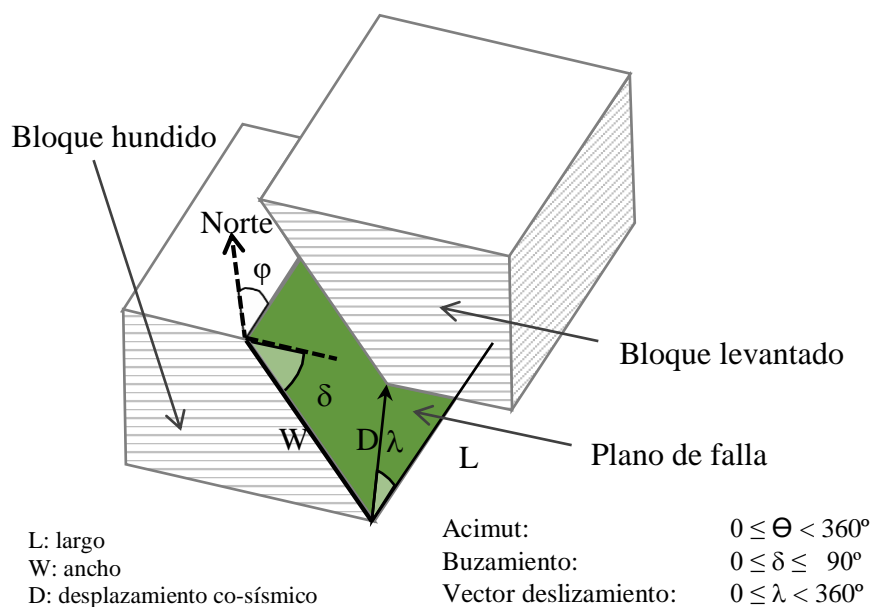


Figura 8. Geometría y parámetros de la falla.

Debe entenderse que un terremoto es la ruptura irregular dentro del plano de falla, por lo tanto, cuando se considera una falla como la fuente sísmica activa, se debe modelizar dicho plano de falla como superficie contenedora del plano de ruptura, de acuerdo a los tres ángulos identificados anteriormente, las coordenadas de un punto de la traza de la falla y la profundidad de la misma.

La magnitud del evento potencial está relacionada con el tamaño del plano de ruptura, existiendo modelos empíricos en la literatura científica que relacionan ambos parámetros, como Wells and Coppersmith 1994; Stirling et al. 2002, 2008, Leonard 2010 entre otras, Por lo tanto, el tamaño del plano de falla condicionará la magnitud máxima del sismo que pueda generar, sin poder exceder el plano de ruptura el tamaño del plano de falla donde se genera.

La recurrencia o tasa de sismos que puede generar una falla dependerá de la velocidad de acumulación de esfuerzos (tasa de deslizamiento mm/año) y de la capacidad de la corteza a resistir dichos esfuerzos (μ es el módulo de rigidez o de cizalla de la corteza).

Caracterización de la trayectoria

En la caracterización de la trayectoria se estudia como es el comportamiento de la atenuación de la onda sísmica desde la fuente hasta el emplazamiento, dicho estudio se lo realiza a través de modelos matemáticos, denominados modelos o ecuaciones de predicción de movimiento fuerte o leyes de atenuación.

Este tipo de ecuaciones permite traducir la energía liberada en un sismo en aceleración (o intensidad) esperada en un emplazamiento a una distancia determinada (Figura 9)

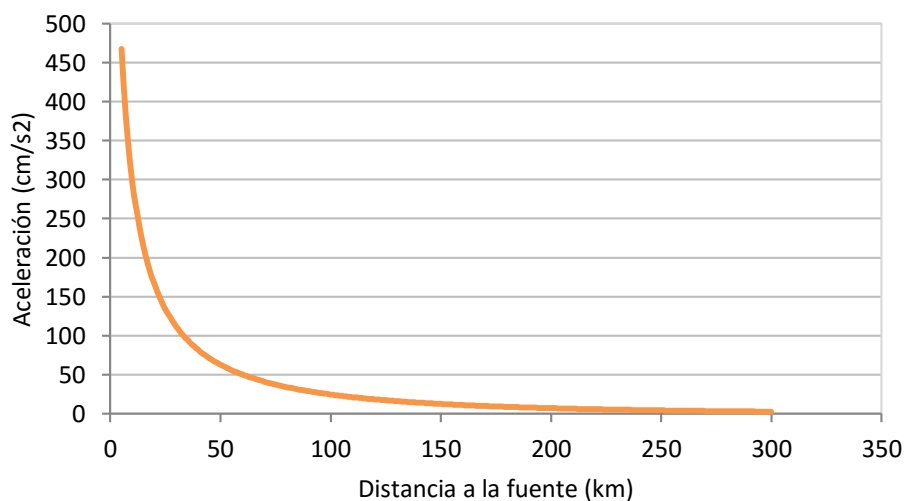


Figura 9. Atenuación de la aceleración en función de la distancia y la magnitud.

Existen dos metodologías para obtener un modelo de movimiento fuerte, a partir de métodos analíticos, desarrollando un modelo de corteza y luego deduciendo el comportamiento de la onda a su paso, o a partir de métodos empíricos, utilizando bases de datos de aceleraciones registradas por sismos reales de diferente magnitud y a distinta distancia. De las dos metodologías, la segunda es la más empleada en el ámbito científico, ofreciendo la literatura un gran número de ellos para ser aplicados en estudios de peligrosidad sísmica (para zonas de cortical: Abrahamson et al. 2013, Boore et al. 2013, Campbell y Bozorgnia 2013, Chiou y Youngs 2013, Idriss 2013 y para zonas de subducción: Kanno et al. (2006) Lin and Lee (2008) McVerry et al. (2006) Youngs et al. (1997) Zhao et al. (2006) Atkinson and Macias (2009) Garcia et al. (2005) entre otros)

La selección del modelo más idóneo para emplear en un estudio depende de las características de cada región y el régimen tectónico asociado. Pueden identificarse modelos de movimiento fuerte para zonas de cortical, subducción interfase, subducción intraplaca y de zonas volcánicas entre otros.

Caracterización del efecto de sitio

Cuando se caracteriza el efecto de sitio se estudia las características litológicas, topográficas, estructura del subsuelo y el efecto que tienen bajo el emplazamiento de cálculo. Estas condiciones pueden modificar notablemente el movimiento que se registre en un emplazamiento, llegando incluso a duplicar o triplicar dicha aceleración.

Con el fin de incluir dicho efecto en el movimiento esperado, se realiza una clasificación geotécnica del terreno. En Ecuador, la clasificación geotécnica propuesta en la NEC15 establece 6 tipos de suelo, cuya respuesta al movimiento se incrementa en función de sus características (Tabla 2).

Tabla 2.
Clasificación geotécnica del suelo según NEC15

| TIPO DE PERFIL | DESCRIPCIÓN | DEFINICIÓN |
|----------------|--|--|
| A | Perfil de roca competente | $V_s \geq 1500$ m/s |
| B | Perfil de roca de rigidez media | 1500 m/s $> V_s \geq 760$ m/s |
| C | Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o | 760 m/s $> V_s \geq 360$ m/s |
| | Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios | $N \geq 50.0$ $S_u \geq 100$ KPa |
| D | Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o | 360 m/s $> V_s \geq 180$ m/s |
| | Perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones | $50 > N \geq 15.0$ 100 kPa $> S_u \geq 50$ kPa |
| E | Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante, o | $V_s < 180$ m/s |
| | Perfil que contiene un espesor total H mayor de 3 m de arcillas blandas | $IP > 20$ $w \geq 40\%$ $S_u < 50$ kPa |
| F | Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista. | |

Asimismo, se debe determinar el factor de amplificación correspondiente a cada una de las categorías anteriores, esto se puede hacer por medio de factores predeterminados en estudios previos (como los propuestos en el NEHRP (BSSC 2009) Tabla 3) o integrándolos dentro de los modelos de predicción de movimiento fuerte.

Tabla 3.

Factores de amplificación del NEHRP 2009 en función del tipo de suelo y la aceleración pico de entrada.

| PGA (ACELERACIÓN PICO) | | | | | |
|---------------------------|-------|-----|------|-----|-------|
| Tipo de suelo | <0.1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | >0.5 |
| A | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 |
| B | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| C | 1,2 | 1,2 | 1,1 | 1,0 | 1,0 |
| D | 1,6 | 1,4 | 1,2 | 1,1 | 1,0 |
| E | 2,5 | 1,7 | 1,2 | 0,9 | 0,9 |
| PERIODOS CORTOS (< 1.0 s) | | | | | |
| Tipo de suelo | <0.25 | 0,5 | 0,75 | 1 | >1.25 |
| A | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 |
| B | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| C | 1,2 | 1,2 | 1,1 | 1,0 | 1,0 |
| D | 1,6 | 1,4 | 1,2 | 1,1 | 1,0 |
| E | 2,5 | 1,7 | 1,2 | 0,9 | 0,9 |
| PERIODOS LARGOS (> 1.0 s) | | | | | |
| Tipo de suelo | <0.1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | >0.5 |
| A | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 |
| B | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| C | 1,7 | 1,6 | 1,5 | 1,4 | 1,3 |
| D | 2,4 | 2,0 | 1,8 | 1,6 | 1,5 |
| E | 3,5 | 3,2 | 2,8 | 2,4 | 2,4 |

2.2.1 Metodologías para estimar la peligrosidad sísmica.

Tal y como identifican en Benito and Jiménez (1999), los métodos de evaluación de la peligrosidad se clasifican en dos grandes grupos:

- Deterministas. Asumen la hipótesis de estacionariedad de la sismicidad, considerando que los terremotos en el futuro se producirán de forma análoga a como lo hicieron en el pasado y conducen a la estimación de los límites superiores del movimiento, expresados por los valores máximos del parámetro empleado para su descripción.
- Probabilistas. Deducen las relaciones de recurrencia de los fenómenos sísmicos de una zona a partir de la información existente en la misma y con ellas obtienen las funciones de probabilidad de los parámetros buscados. Estas funciones asocian a cada valor del parámetro una probabilidad anual de

excedencia, o bien un período de retomo, que se define como el valor inverso de esa probabilidad.

Independientemente de la metodología de cálculo, los resultados de peligrosidad sísmica, y por lo tanto el movimiento esperado del suelo, pueden darse en términos de aceleración o de intensidad teórica.

La aceleración del suelo corresponde con un parámetro de movimiento cuantitativo, es el más utilizado en Ingeniería sísmica ya que permite obtener espectros de aceleración para diferentes periodos de vibración y, por medio de dicho espectro, establecer los espectros de diseño con los que debe diseñarse una estructura.

La intensidad (teórica), corresponde con un parámetro cualitativo, donde cada grado de intensidad (siendo esta una escala discreta) está asociado a un daño potencial en la estructura. En la Tabla 4, a modo de ejemplo, se muestran las categorías de intensidad propuestas por la escala EMS98.

Tabla 4.
Escala Macrosísmica Europea EMS98

| Intensidad EMS | Resumen |
|---------------------------------|---|
| I No sentido | No sentido |
| II Apenas sentido | Sentido solo por muy poca gente en situación de reposo en cama |
| III Débil | Sentido en el interior de las casas por poca gente. Las personas en reposo sienten un ligero balanceo o temblor |
| IV Ampliamente Observado | Sentido en el interior por mucha gente, fuera por muy pocos. Algunas personas se despiertan. Tintineo de ventanas y vajillas |
| V Fuerte | Sentido en el interior por la mayoría y en el exterior por pocos. Muchas personas se despiertan. Pocas personas se asustan. Los edificios tiemblan. Los objetos colgados oscilan considerablemente. Pequeños objetos se mueven. Puertas o ventanas se balancean o se cierran. |
| VI Levemente dañino | Muchas personas salen asustadas de casa. Algunos objetos se caen. Muchas casas sufren pequeños daños estructurales como grietas o caídas de pequeños trozos de yeso o enlucido |

Continúa



| | |
|-------------------------------------|---|
| VII Dañino | La mayoría de la gente está asustada y corre fuera de casa. Los muebles se levantan y una gran cantidad de objetos cae de las estanterías. Muchos edificios ordinarios bien construidos sufren daños moderados: grietas en las paredes, caída de yeso, colapso parcial de la chimenea. Las construcciones antiguas tienen grandes grietas y caída de tabiques |
| VIII Gravemente Dañino | A mucha gente le resulta difícil permanecer en pie. Muchas casa tienen grandes grietas en los muros. En unos pocos edificios ordinarios bien construidos se dañan seriamente los muros mientras que las estructuras antiguas y débiles pueden colapsar |
| IX Destructor | Pánico generalizado. Muchas construcciones débiles colapsan. Incluso edificios construidos adecuadamente presentan daños importantes: serios colapsos de muros y colapso parcial de la estructura. |
| X Muy Destructor | Muchos edificios correctamente construidos colapsan |
| XI Devastador | Muchos edificios bien construidos colapsan, incluso algunos con diseño sismo resistentes, |
| XII Completamente devastador | Casi todos los edificios son destruidos. |

Ambos parámetros suelen ser utilizados en estudios de riesgo, el empleo de uno u otro dependerá de la metodología de riesgo empleada. También es posible transformar un parámetro en otro por medio de ecuaciones empíricas, como las presentadas en Trifunac 1975, Murphy 1977, Lomnitz 1974, Saragoni 1982 y Gómez 2002 entre otros.

2.2.2 Metodología empleada en este estudio

La metodología que se desarrolló para estimar la amenaza sísmica en este trabajo fue la determinista. Esta metodología, como ya se indicó anteriormente, asume la hipótesis de estacionalidad de la sismicidad partiendo de la premisa de que los terremotos en el futuro se comportarán de forma semejante al pasado (Benito and Jiménez 1999).

Esta metodología determinista, fue implementada con dos escenarios, uno suponiendo un sismo próximo de magnitud moderada, asociado al régimen de cortical, y otro suponiendo un sismo lejano de gran magnitud, asociado al régimen de subducción interfase.

En ambos casos se define la geometría de la fuente generadora y se asigna una magnitud probable acorde con dicha fuente. Definiendo el plano de ruptura potencial en tamaño y localización.

Para modelizar la trayectoria se emplea un modelo de movimiento fuerte en términos de aceleración que considera el efecto de sitio.

Posteriormente, se estima la intensidad teórica máxima que se espera empleando una ecuación de correlación entre aceleración e intensidad. Obteniendo finalmente las intensidades teóricas esperadas en el emplazamiento debido a los dos sismos de estudio.

En la Figura 10 se muestran las fases metodológicas establecidas para obtener los dos escenarios de amenaza.

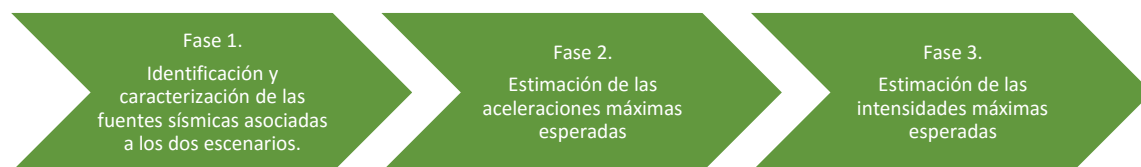


Figura 10. Diagrama metodológico para estimar la peligrosidad sísmica asociada a los dos sismos de estudio.

2.3 VULNERABILIDAD Y RIESGO SÍSMICO

Los daños en las edificaciones asociados a los terremotos, ponen de manifiesto la importancia de planificar las ciudades y la gran influencia que tiene el comportamiento de los edificios como consecuencia de los resultados de pérdidas humanas y económicas. Ante la imposibilidad de evitar la ocurrencia de terremotos y de predecirlos con un margen pequeño de tiempo para tomar acciones a corto plazo, la reducción de la vulnerabilidad de los elementos expuestos es la medida más eficaz para prevenir los daños y para evitar el desastre, tal y como indica Martínez 2014.

La vulnerabilidad sísmica de un edificio, grupo de edificios o de una zona urbana completa se define como su predisposición intrínseca a sufrir daño ante la ocurrencia de un movimiento sísmico de una severidad determinada (Barbat 1998).

El riesgo sísmico de un lugar, se estima en términos de daño, que dan la distribución de los grados de daño esperados (porcentajes de cada grado de daño) para cada clase de vulnerabilidad y ante una cierta intensidad de movimiento. Como se expresa en la ecuación [2], suele usarse con frecuencia el concepto de convolución para modelar el riesgo de cada elemento expuesto y se dice que el riesgo es la convolución de tres funciones temporales: la peligrosidad, la vulnerabilidad y la exposición.

$$\text{Riesgo} = \text{Peligrosidad} * \text{Vulnerabilidad} * \text{Exposición} \quad [2]$$

La ecuación [2] es conceptualmente potente y sencilla. Con todo, su aplicación no es directa dado que la definición de las tres funciones involucradas es compleja.

El análisis de riesgo de un sector, ciudad, país o región se suele efectuar en el dominio de las probabilidades y requiere la integración o suma de los resultados de la ecuación [2]. Suele ser más útil y frecuente realizar estudios parciales del riesgo sísmico evaluando sólo determinados elementos (escenarios). Un escenario se define como la situación generada por la ocurrencia de un evento cuyo significado puede ser el de un terremoto histórico (escenario determinista) o un terremoto con una probabilidad determinada. (Lantada 2007).

Ferliche 2012 indica que para determinar el daño se tiene numerosas formas de evaluar los escenarios de sismicidad, sean estos mediante el grado de daño sufrido por la infraestructura, por el número de edificios inhabitables. Esta estimación de daño, se va a centrar principalmente en el daño sufrido por las edificaciones.

Para representar el daño esperado se utilizan tanto parámetros absolutos (en términos de número total de edificios) como relativos (en términos de porcentaje), desglosados por tipos de vulnerabilidad y grado de daño.

2.3.1 Metodología para estudiar la vulnerabilidad y el daño en estructuras

Los estudios e iniciativas conocidos internacionalmente, realizan un estudio exhaustivo sobre el comportamiento estructural y constructivo de las edificaciones, considerando el edificio como un elemento individual de la ciudad, en los cuales se pondera parámetros, aumentando o disminuyendo de esta manera la vulnerabilidad final del edificio. A continuación se comentan brevemente estas iniciativas internacionales, tal y como indica Martínez 2012.

Applied Technology Council (ATC)

El Consejo de Tecnología Aplicada, más conocido por sus siglas en inglés ATC - Applied Technology Council, es una sociedad no lucrativa que tiene su sede en California, cuyo objetivo es asesorar y asistir a profesionales en el campo de la ingeniería civil y la arquitectura. Por encargo de la Agencia Federal para la Gestión de Emergencias (Federal Emergency Management Agency, FEMA), elaboró dos informes referenciados como ATC-13 (1985) y ATC-25 (1991) para el análisis del riesgo sísmico. El informe ATC-13, “Earthquake Damage evaluation data for California” forma parte de un proyecto para evaluar daños sísmicos causados por terremotos en California. El informe incluye un total de 78 matrices de probabilidad de daño correspondientes a diferentes tipos de instalaciones y servicios (Facility Classes FC), 40 de los cuales corresponden a edificios y las restantes 38 a otras estructuras o infraestructuras. El informe ATC-25 “Seismic Vulnerability and impact of disruption of lifelines in the conterminous United States” analiza el daño y el impacto de la interrupción de las líneas vitales por causa de los terremotos. En este segundo informe se actualizan y generalizan las matrices y funciones que permiten estimar el daño en estructuras e infraestructuras vitales. Esta metodología dispone de herramientas que permiten evaluar, de forma rápida y eficiente, el daño esperado en la casi totalidad de las infraestructuras. Las funciones del informe ATC-13 fueron obtenidas para la región californiana. La intención del informe ATC-25 es que sea aplicable a cualquier zona de Estados Unidos dando también recomendaciones para su aplicación y proponiendo penalizaciones. Por ello, la aplicación de esta metodología a una zona distinta de Estados Unidos requiere un análisis cuidadoso y experto que permita su adaptación, cuantificando de forma adecuada las penalizaciones correspondientes.

Índice de vulnerabilidad italiano (Iv)

Este método Italiano fue el primer método en utilizar un índice de vulnerabilidad para evaluar la vulnerabilidad de las edificaciones. En 1982 un grupo de investigadores italianos desarrolló una metodología denominada

metodología del índice de vulnerabilidad a partir de la información de daño en edificios provocados por terremotos desde 1976, después del terremoto de Friuli. A partir de esta información se elaboró una gran base de datos con el índice de vulnerabilidad de cada tipo de edificio y el daño sufrido por terremotos de determinada intensidad. En dichos estudios se empezaron a utilizar formularios de inspección de daños, que fueron luego mejorados con ocasión del terremoto de Irpinia de 1980, y que son la base de los que se utilizan hoy en día.

Esta metodología está fundamentada en datos reales y se puede aplicar en estudios a nivel urbano. El método del índice de vulnerabilidad utiliza los datos obtenidos mediante inspección para realizar una calificación de la calidad del diseño y construcción sismorresistente de los edificios mediante un coeficiente denominado índice de vulnerabilidad. La operación de calificación consiste en hacer una valoración de once parámetros estructurales preestablecidos por expertos y calcular, a partir de estos valores, el índice de vulnerabilidad; la valoración de alguno de estos parámetros se apoya también en el daño que sufre la estructura, a través de funciones de vulnerabilidad para cada grado de intensidad macrosísmica del terremoto o para diferentes niveles de aceleración máxima.

European Macroseismic Scale (EMS-98)

La escala de intensidades EMS-98 es una actualización de la escala MSK-64 y, en referencia a los edificios, quizás la aportación más novedosa es la inclusión de un mayor número de tipologías constructivas. Edificios de diferentes tipos pueden presentar daños similares.

La escala de intensidad EMS-98, al igual que la escala MSK que la precedía, pertenece a una familia de escalas de intensidad cuyo origen fue la popular escala de diez grados elaborada por Rossi y Forel; esta fue revisada por Mercalli, posteriormente expandida a doce grados por Cancani, y después definida en una fórmula muy completa por Sieberg como la escala Mercalli - Cancani- Sieberg (MCS). Esta es la escala que sirve de punto de partida no solamente para la escala MSK/EMS-98 sino también para numerosas versiones de la escala "Mercalli Modificada". La mayoría de estas escalas de doce grados son aproximadamente equivalentes en sus valores actuales, y sólo se diferencian en el grado de sofisticación empleado para su formulación.

La palabra vulnerabilidad se usa a lo largo de la Escala Macrosísmica Europea para expresar las diferencias en la forma en la que responden los edificios a las vibraciones ocasionadas por terremotos. Si dos grupos de edificios son sometidos exactamente a la misma vibración ocasionada por un

terremoto y un grupo responde mejor que el otro, se puede decir que los edificios menos dañados poseen una menor vulnerabilidad sísmica que los edificios más dañados, o que los edificios menos dañados eran más sismorresistentes que los otros y viceversa

HAZUS

El programa HAZUS fue desarrollado en los Estados Unidos en 1999 para evaluar la vulnerabilidad sísmica de las ciudades empleando el método del espectro de capacidad. Actualmente es una de las metodologías más conocidas y utilizadas para el análisis de la vulnerabilidad sísmica. Esta utiliza los desplazamientos y aceleraciones espectrales como medida de la acción sísmica, en vez de la intensidad sísmica que se utiliza en la ATC-13. Se realiza una clasificación de 36 tipologías de edificios según su estructura, y el daño de estos 36 modelos estructurales se estima a partir de la opinión de expertos. Para cada modelo, se describen los cuatro estados de daño estructural considerados: leve, moderado, severo y colapso. Los daños no estructurales se analizarán aparte. Para cada tipo de construcción y nivel de diseño, se dan los parámetros que permiten definir la capacidad de la estructura, las derivas máximas entre piso y finalmente los desplazamientos espectrales en los umbrales de los diferentes estados de daño considerados.

RISK-UE

El principal objetivo del proyecto Risk-UE (Risk-UE 2003, Mouroux et al. 2004) era proponer métodos avanzados de análisis de riesgo sísmico que permitieran incorporar las características de los edificios. El estudio de vulnerabilidad de los edificios actuales, evalúa la vulnerabilidad de un edificio mediante dos metodologías. La primera metodología se basa en el método del índice de vulnerabilidad y la segunda en espectros de capacidad y curvas de fragilidad.

La metodología del índice de vulnerabilidad, llamada también en Risk-UE de Nivel I, clasifica el parque constructivo de la ciudad en clases de vulnerabilidad, para después realizar un análisis de vulnerabilidad de cada edificio individual. Abarca en un sólo índice un gran número de parámetros entre los que destacan los urbanísticos regularidad en planta y posición del edificio en la parcela. La acción sísmica la cuantifica por medio de la intensidad macrosísmica y el edificio por medio de un índice.

El método del espectro de capacidad, llamado también en Risk-UE de Nivel II, requiere la obtención del espectro de capacidad y curvas de fragilidad específicas para los edificios analizados. La acción sísmica se considera en términos de espectros de respuesta inelástica o espectros de demanda y caracteriza el edificio mediante su espectro de capacidad (MEC), que en

aproximación bilineal se expresa por medio de dos puntos denominados punto de cedencia y punto de capacidad última.

2.3.2 Metodología empleada en este estudio

Para este trabajo se seleccionó la metodología de Índice de Vulnerabilidad MIV por ser de fácil implementación por medio de un SIG y, al mismo tiempo, completa en la caracterización de la vulnerabilidad, donde no solo clasifica las edificaciones de acuerdo a los parámetros tradicionales (tipología constructiva), si no que aplica unos correctores a dichas tipologías de acuerdo al estado de conservación, reformas realizadas y nivel de código entre otros.

El comportamiento de un edificio ante un terremoto no solo depende de su sistema estructural y de su construcción, existen otros factores como la calidad de su construcción, la altura y su mantenimiento, que también se deben tener en cuenta. El MIV se basa en las propuestas de Benedetti and Petrini 1982 y de Angeletti et al. 1988. En este método, tanto la vulnerabilidad de los edificios como el daño se cuantifican mediante índices. (Martínez 2014).

Concretamente, para estimar el potencial de daño de los edificios el MIV utiliza dos variables, el índice de vulnerabilidad (Iv) de las estructuras, como variable de vulnerabilidad, y la Intensidad sísmica I, como variable de peligrosidad o amenaza. Identificando finalmente 6 tipos de daño, que van desde 0 (sin daño) hasta 5 (colapso).

2.3.2.1 Índice de Vulnerabilidad Iv

El Iv representa puntuaciones que cuantifican y valoran el comportamiento sísmico de un edificio. Se trata de un método simplificado, versátil y robusto, cuya principal ventaja reside en la facilidad de describir la vulnerabilidad de los edificios con un gran nivel de detalle, permitiendo capturar las calidades estructurales y altura de cada estructura. (Feriche 2012).

Este método utiliza un valor numérico para cuantificar el comportamiento sísmico del edificio que varía de 0 a 1 (siendo 0 las menos vulnerables y 1 las edificaciones más vulnerable), pudiendo este último valor ser superado en aquellas estructuras más precarias. Para obtener el índice de cada construcción es necesario

identificar la tipología constructiva (estructura) y añadir una serie de modificadores que van penalizando o reduciendo el índice inicial asignado (Martínez 2014).

El índice de vulnerabilidad característico de cada edificio en particular se evalúa según la siguiente ecuación [3] (Feriche 2012):

$$I_v = I_v^* + \Delta M_R + \sum_{j=1}^n M_{c_j} \quad [3]$$

Donde I_v^* corresponde con el índice de vulnerabilidad por clase, ΔM_R corresponde con un modificador regional y M_{c_j} corresponde con una serie de modificadores por comportamiento

Índice de vulnerabilidad por clase I_v^*

Este primer índice de vulnerabilidad se estima al asignar una clase o tipología constructiva tipo a cada edificación de la zona de estudio, para ello se emplea la *Matriz de Tipologías (BTM) de RISK-UE* (Milutinovic y Trendafiloski, 2003) (Tabla 5), donde se diferencian 23 clases de edificios (10 de mampostería, 7 de hormigón armado, 5 de estructura metálica y 1 con estructura de madera). A cada clase o tipología constructiva tipo se le asigna un valor medio de índice de vulnerabilidad (I_v^*), que posteriormente será ampliado o reducido de acuerdo a los otros modificadores de comportamiento o regionales, dentro de unos valores máximos y mínimos preestablecidos.

Tabla 5. Índices de vulnerabilidad propuestas para los edificios de la Matriz de Tipologías (BTM) de RISK-UE (Milutinovic y Trendafiloski, 2003)

| TIPOLOGÍA A | DESCRIPCIÓN | ÍNDICES DE VULNERABILIDAD REPRESENTATIVOS | | | | | |
|----------------|-------------|--|---------|---------|---------|-------------|-------|
| | | V_I^{min} | V_I^- | V_I^* | V_I^+ | V_I^{max} | |
| MAMPOSTERÍA | M1.1 | Cascotes y piedras (Rubble Stone, fieldstone) | 0.620 | 0.810 | 0.873 | 0.980 | 1.020 |
| | M1.2 | Piedra sencilla (Simple stone) | 0.460 | 0.650 | 0.740 | 0.830 | 1.020 |
| | M1.3 | Sillería (Massive stone) | 0.300 | 0.490 | 0.616 | 0.793 | 0.860 |
| | M2 | Adobe | 0.620 | 0.687 | 0.840 | 0.980 | 1.020 |
| | M3.1 | Suelos de madera (Wooden slabs) | 0.460 | 0.650 | 0.740 | 0.830 | 1.020 |
| | M3.2 | Paredes de mampostería (Masonry vault) | 0.460 | 0.650 | 0.776 | 0.953 | 1.020 |
| | M3.3 | Forjados mixtos de acero y mampostería (Composite Steel and masonry slabs) | 0.460 | 0.527 | 0.704 | 0.830 | 1.020 |
| | M3.4 | Forjados de losas de hormigón armado (Reinforced concrete slabs) | 0.300 | 0.490 | 0.616 | 0.793 | 0.860 |
| | M4 | Paredes de mampostería confinadas o | 0.140 | 0.330 | 0.451 | 0.633 | 0.700 |

Continúa



| | | reforzadas (Reinforced or confined masonry walls) | | | | | |
|----------|--------------|--|--------|-------|-------|-------|-------|
| | M5 | Totalmente reforzada (Overall strengthened) | 0.300 | 0.490 | 0.694 | 0.953 | 1.020 |
| HORMIGÓN | RC1 | Estructuras de hormigón (concrete moment frames) | -0.02 | 0.047 | 0.442 | 0.800 | 1.020 |
| | RC2 | Paredes de cortante de hormigón (Concrete shear walls) | -0.020 | 0.047 | 0.386 | 0.670 | 0.860 |
| | RC3.1 | Paredes de relleno regulares (Regularly infilled walls) | -0.020 | 0.007 | 0.402 | 0.760 | 0.980 |
| | RC3.2 | Estructuras irregulares (irregular frames) | 0.060 | 0.127 | 0.522 | 0.880 | 1.020 |
| | RC4 | Sistemas duales de Hormigón armado (RC dual systems – RC frame and wall) | -0.020 | 0.047 | 0.386 | 0.670 | 0.860 |
| | RC5 | Hormigón pre-colado (Precast concrete Tilt-up Walls) | 0.140 | 0.207 | 0.384 | 0.510 | 0.700 |
| | RC6 | Estructuras de hormigón pre-colado, muros de cortante de hormigón (Precast C. Frames, C. shear walls) | 0.300 | 0.367 | 0.544 | 0.670 | 0.860 |
| ACERO | S1 | Estructuras de acero (Steel Moment Frames) | -0.02 | 0.467 | 0.363 | 0.640 | 0.860 |
| | S2 | Estructuras metálicas atirantadas (Steel braced frames) | -0.020 | 0.467 | 0.287 | 0.480 | 0.700 |
| | S3 | Estructuras metálicas con paredes de mampostería (Steel frame + unreinf. mas. Infill walls) | 0.140 | 0.330 | 0.484 | 0.640 | 0.860 |
| | S4 | Estructuras metálicas con paredes de cortante hormigonadas in situ (Steel frame+cast-in-place shear walls) | -0.020 | 0.047 | 0.224 | 0.350 | 0.540 |
| | S5 | Sistemas o estructuras compuestas (metálicas y hormigón armado) Steel and RC composite system | -0.020 | 0.257 | 0.402 | 0.720 | 1.020 |
| MADERA | W | Estructuras de madera (Wood structures) | 0.140 | 0.207 | 0.447 | 0.640 | 0.860 |

Modificador regional ΔMR

El modificador regional valora la calidad de las distintas tipologías de edificios según la región donde se encuentran y se asigna en función del juicio experto y/o de la vulnerabilidad observada. Para determinar el valor de este modificador en la zona de estudio se tiene en cuenta las distintas normativas sismorresistentes y su fecha de aplicación (Martínez 2014).

Modificadores por comportamiento M_{Cj}

Las características particulares de cada edificio se tienen en cuenta en los modificadores por comportamiento. Estos modificadores permiten incorporar al análisis de vulnerabilidad particularidades del edificio tales como: el estado de conservación, la altura o número de pisos, intervenciones de reparación y la morfología del terreno.

En el trabajo de Milutinovic y Trendafiloski (2003) se proporciona una serie de pautas para la modificación de los índices de vulnerabilidad de cada edificio mediante una sumatoria de valores analizados independientemente para la penalización o mejora de cada índice previo, basados en la propuesta de la ATC-21 y la *National Group for Defense from Earquake* (GNDT), dependiendo de la calidad y cantidad de la información disponibles y de las características específicas de los edificios (Martínez 2014).

Estos modificadores varían el índice de vulnerabilidad previamente establecido según la tipología estructural del edificio al que pertenecen. La medio y código de nivel alto).

Tabla 6 muestra los factores de comportamiento para edificios de mampostería no reforzada, cuantificando la penalización o mejora en cada caso. La Tabla 5 contiene los modificadores de comportamiento para edificios de hormigón armado cuantificándolos según el nivel de diseño sismorresistente (código de nivel bajo, código de nivel medio y código de nivel alto).

Tabla 6.

Modificadores de comportamiento del índice de vulnerabilidad VI, para edificios de mampostería no reforzada (Milutinovic y Trendafiloski, 2003)

| FACTORES DE COMPORTAMIENTO | PARÁMETROS | PUNTUACIÓN DEL MODIFICADOR M_{cj} |
|-----------------------------------|---|-------------------------------------|
| Estado de conservación | Buen mantenimiento | -0.04 |
| | Mal mantenimiento | +0.04 |
| Altura o número de plantas | Bajo (1 o 2) | -0.02 |
| | Medio (3, 4 o 5) | +0.02 |
| | Alto (6 o más) | +0.06 |
| Sistema estructural | Grosor de los muros | -0.04, +0.04 |
| | Distancia entre muros | |
| | Conexión entre muros: barras de unión (tie-roads), soportes en las esquinas (angle bracket) | |
| Piso blando (soft-story) | Demolición/ Transparencia, diáfana | +0.04 |
| Irregularidad en planta | ... | +0.04 |

Continúa



| | | |
|--|--|-------------------------|
| Irregularidad vertical | ... | +0.02 |
| Plantas superpuestas | ... | +0.04 |
| Cubierta | Peso y acometida (thrust) de la cubierta Conexiones con la cubierta | +0.04 |
| Intervenciones de reparación | ... | -0.08, +0.08 |
| Elementos antisísmicos | Barbacanas (barbican), Láminas de refuerzo (foil arches), Contrafuertes (buttresses) | |
| Edificio en agregado: posición en planta | Intermedio Esquina Terminal (Header) | -0.04 +0.04 +0.06 |
| Edificio en agregado: posición en elevación | Plantas escalonadas Edificios adyacentes de diferente altura | +0.02 -0.04, +0.04 |
| Cimientos | Cimientos a diferentes niveles | +0.04 |
| Morfología del terreno | Pendiente Precipicio o acantilado | +0.02 +0.04 |

Tabla 7.

Modificadores de comportamiento del índice de vulnerabilidad VI, para edificios de hormigón armado (Milutinovic y Trendafiloski, 2003).

| FACTORES DE COMPORTAMIENTO | PARÁMETROS | PUNTUACIÓN DEL MODIFICADOR M_{cj} |
|--|---|-------------------------------------|
| Estado de conservación | Buen mantenimiento | -0.04 |
| | Mal mantenimiento | +0.04 |
| Altura o número de plantas | Bajo (1 o 2) | -0.02 |
| | Medio (3, 4 o 5) | +0.02 |
| | Alto (6 o más) | +0.06 |
| Sistema estructural | Grosor de los muros | -0.04, +0.04 |
| | Distancia entre muros | |
| | Conexión entre muros: barras de unión (tie-roads), soportes en las esquinas (angle bracket) | |
| | | |
| Piso blando (soft-story) | Demolición/ Transparencia, diáfana | +0.04 |
| Irregularidad en planta | ... | +0.04 |
| Irregularidad vertical | ... | +0.02 |
| Plantas superpuestas | ... | +0.04 |
| Cubierta | Peso y acometida (thrust) de la cubierta Conexiones con la cubierta | +0.04 |
| | | |
| Intervenciones de reparación | ... | -0.08, +0.08 |
| Elementos antisísmicos | Barbacanas (barbican), Láminas de refuerzo (foil arches), Contrafuertes (buttresses) | |
| Edificio en agregado: posición en planta | Intermedio Esquina Terminal (Header) | -0.04 +0.04 +0.06 |
| | | |
| | | |
| Edificio en agregado: posición en elevación | Plantas escalonadas Edificios adyacentes de diferente altura | +0.02 -0.04, +0.04 |
| | | |
| Cimientos | Cimientos a diferentes niveles | +0.04 |
| Morfología del terreno | Pendiente Precipicio o acantilado | +0.02 +0.04 |
| | | |

2.3.2.2 Estimación del daño

El MIv también estima el daño esperado en las estructuras de acuerdo al Iv establecido y la Intensidad macrosísmica esperada.

Esta estimación se hace por medio de dos pasos, en el primero se estima el daño probable (uD) que tendrá cada estructura y en segundo se estima la probabilidad de que la estructura tenga diferentes grados de daño (desde sin daño hasta colapso).

La determinación del Daño Probable se realiza a partir de la función de distribución de probabilidad de los estados de daño de un edificio, (Lantada 2007). Como menciona Feriche (2012), esta metodología propuesta por Giovanazzi and Lagomarsino 2002 y descrita por Milutinovic and Trendafiloski 2003 correlacionan el grado de daño probable uD, la intensidad macrosísmica I y el índice de vulnerabilidad Iv mediante funciones semiempíricas definidas por la Ecuación [4].

$$uD = \left[1 + Tgh \left(\frac{I+6.25*Iv-13.1}{2.3} \right) \right] \quad [4]$$

En esta expresión, la acción está definida mediante la intensidad Macrosísmica (I) y el elemento expuesto mediante un índice de vulnerabilidad (Iv).

Una vez calculado el daño probable (uD), el siguiente paso será calcular las probabilidades de tener los diferentes grados de daño, la MIv considera los mismos grados que la escala macrosísmica EMS-98 (1 a 5) (**¡Error! No se encuentra el rigen de la referencia.** y Figura 12), a los que añade un grado más para abarcar los edificios que no sufren ningún tipo de daño. Por esta razón, los seis grados o estados de daño considerados por el MIv van desde 0 (sin daño), 1 (daño leve), 2 (daño moderado), 3 (daño severo), 4 (daño extensivo) y 5(colapso).




| Clasificación de daños en edificios de fábrica | |
|---|--|
| <p>Grado 1: Daños de despreciables a ligeros (ningún daño estructural, daños no-estructurales ligeros)</p> <p>Fisuras en muy pocos muros. Caída sólo de pequeños trozos de revestimiento. Caída de piedras sueltas de las partes altas de los edificios en muy pocos casos.</p> |  |
| <p>Grado 2: Daños moderados <i>(daños estructurales ligeros, daños no-estructurales moderados)</i></p> <p>Grietas en muchos muros. Caída de trozos bastante grandes de revestimiento. Colapso parcial de chimeneas.</p> |  |
| <p>Grado 3: Daños de importantes a graves <i>(daños estructurales moderados, daños no-estructurales graves)</i></p> <p>Grietas grandes y generalizadas en la mayoría de los muros. Se sueltan tejas del tejado. Rotura de chimeneas por la línea del tejado. Se dañan elementos individuales no-estructurales (tabiques, hastiales y tejados).</p> |  |
| <p>Grado 4: Daños muy graves <i>(daños estructurales graves, daños no-estructurales muy graves)</i></p> <p>Se dañan seriamente los muros. Se dañan parcialmente los tejados y forjados.</p> |  |
| <p>Grado 5: Destrucción <i>(daños estructurales muy graves)</i></p> <p>Colapso total o casi total.</p> |  |

Figura 11. Grados de daño de la escala EMS98 para edificios de fábrica

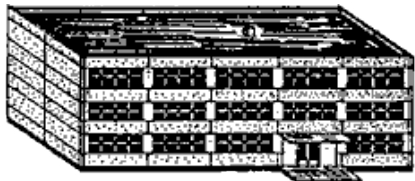




| Clasificación de daños en edificios de hormigón armado | |
|---|--|
| <p>Grado 1: Daños de despreciables a ligeros (ningún daño estructural, daños no-estructurales ligeros)</p> <p>Fisuras en el revestimiento de pórticos o en la base de los muros. Fisuras en tabiques y particiones.</p> |  |
| <p>Grado 2: Daños moderados (daños estructurales ligeros, daños no-estructurales moderados)</p> <p>Grietas en vigas y pilares de pórticos y en muros estructurales. Grietas en tabiques y particiones; caída de enlucidos y revestimientos frágiles. Caída de mortero de las juntas de paneles prefabricados.</p> |  |
| <p>Grado 3: Daños de importantes a graves (daños estructurales moderados, daños no-estructurales graves)</p> <p>Grietas en pilares y en juntas viga/pilar en la base de los pórticos y en las juntas de los muros acoplados. Desprendimiento de revocos de hormigón, pandeo de la armadura de refuerzo. Grandes grietas en tabiques y particiones; se dañan paneles de particiones aislados.</p> |  |
| <p>Grado 4: Daños muy graves (daños estructurales graves, daños no-estructurales muy graves)</p> <p>Grandes grietas en elementos estructurales con daños en el hormigón por compresión y rotura de armaduras; fallos en la trabazón de la armadura de las vigas; ladeo de pilares. Colapso de algunos pilares o de una planta alta.</p> |  |
| <p>Grado 5: Destrucción (daños estructurales muy graves)</p> <p>Colapso de la planta baja o de partes (por ejemplo alas) del edificio.</p> |  |

Figura 12. Grados de daño de la escala EMS98 para edificios de hormigón armado

Para ello, se modela la probabilidad $P\beta(x)$ de un edificio de una tipología determinada a sufrir un cierto grado de daño, al ser afectado por un terremoto de una intensidad sísmica determinada x , mediante la función de distribución Beta o Binomial equivalente representada por la Ecuación [5].

$$P\beta(x) = \frac{\Gamma(t)}{\Gamma(r)\Gamma(t-r)} * \frac{(x-a)^{r-1} * (b-x)^{t-r-1}}{(b-a)^{t-1}} \quad [5]$$

Donde Γ es la función Gamma, a y b definen los valores extremos de la función de densidad de probabilidad de la distribución y deben tomar valores que permitan hallar las probabilidades de ocurrencia o de excedencia de cada uno de los estados de daño considerados (son seis, $a = 0$ (sin daño) y $b = 6$ (colapso)). El parámetro t afecta a la dispersión de la distribución y su valor se fija en 8, para que la distribución Beta, en este caso, sea similar a la distribución Binomial (Giovinazzi and Lagomarsino 2002). Después se ajusta el parámetro r de manera que la distribución Binomial del parámetro uD sea equivalente a la distribución Beta definida por la ecuación [5] mediante la relación de la Ecuación [6] y que se define por un único parámetro, el grado de daño medio uD :

$$r = t(0.007uD^3 - 0.052uD^2 + 0.2875uD) \quad [6]$$

Donde uD y (r,t) son respectivamente los parámetros de las distribuciones Binomial y Beta. La función de Distribución Beta (Acumulada) define la probabilidad de que el grado de daño se halle entre los valores a y b (Figura 13).

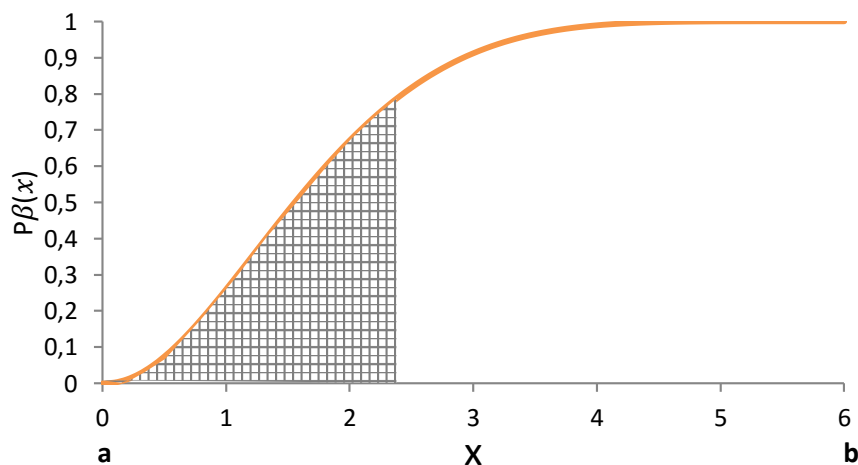


Figura 13. Función de distribución de probabilidad de beta.

Para obtener la probabilidad de cada grado de daño k (desde 0 hasta 5) se emplea la Ecuación [7]:

$$P_k = P_\beta(k - 1) - P_\beta(k) \quad [7]$$

Donde P_k define el daño individual que va desde 0 hasta 5 (D0-sin daño, D1-daño leve, D2-daño moderado, D3-daño severo, D4-daño extensivo y D5-colapso) (Figura 14).

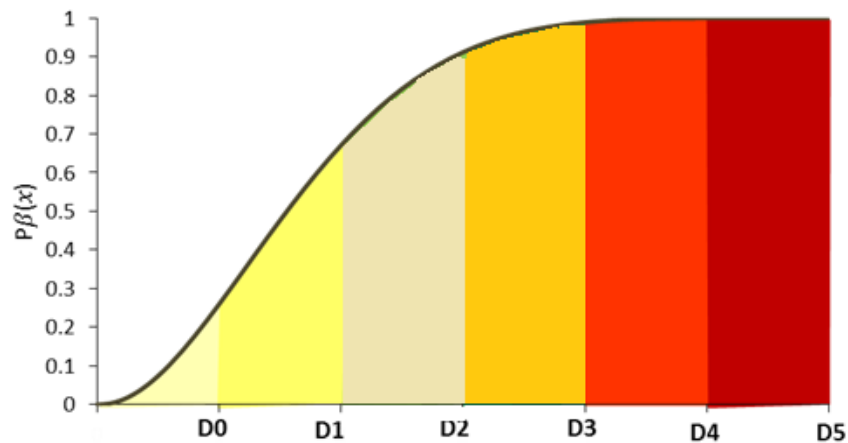


Figura 14. Distribución de probabilidad beta para cada grado de daño. Esta rampa de color no está bien elegida.

2.4 EL SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)

2.4.1 Los sistemas de información geográfica.

La información geográfica es un componente fundamental en un gran número de actividades de toda índole y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son la herramienta básica para su manejo y utilización. En el contexto de los países en desarrollo, Olaya 2009 indica que el uso conjunto de SIG, geodatos libres y estándares abiertos se muestra como una solución óptima que puede contribuir positivamente al avance de éstos, y que constituye la mejor alternativa posible para el trabajo con información geográfica.

El término SIG proviene del acrónimo de Sistema de Información Geográfica (GIS en inglés: Geographic Information System). Los SIG constituyen una rama de la ciencia que evoluciona muy deprisa, esta rápida evolución se refleja en las numerosas y cambiantes definiciones de se ofrecen sobre lo que es un SIG y la

diversidad de formación y capacidades de los profesionales que se dedican a su desarrollo.

Una de las definiciones más extendida y aceptada puede traducirse de la siguiente manera “Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son sistemas de computación basada en hardware, software y datos georreferenciados que se puede utilizar para recopilar, almacenar, gestionar, procesar, analizar y visualizar información espacial y no espacial que representan fenómenos geográficos del mundo real (Burrough and McDonnell 1998).

Llevan a cabo un proyecto SIG, no entendido como el empleo de un software sino como una herramienta del cálculo geoespacial con múltiples finalidades y que integra a un equipo multidisciplinar, conlleva una serie de procesos que pueden agruparse en 6 fases fundamentales:

1. Recopilación de información. Se recopila toda la información necesaria para desarrollar el SIG. Esta información dependerá de la temática y propósito del mismo y cuyo origen, formato y escala puede ser muy diverso.
2. Procesado de datos. Se corrigen, tratan, homogenizan, almacenan y metadatan todos los datos recopilados.
3. Diseño del modelo conceptual. Se estructura toda la información de partida, estableciendo las conexiones que existen entre los elementos y capas de información.
4. Desarrollo de geoprocursos. Se combinan todas las capas anteriores por medio del álgebra de capas, creando consultas locales y zonales e implementando metodologías de estimación de nuevas variables.
5. Análisis de resultados. Se analizan las nuevas capas de información geográfica obtenidas y se sacan conclusiones.
6. Publicación de resultados. Se desarrollan los productos finales del SIG como mapas o modelos tridimensionales y se publican de forma impresa o de forma interactiva (por medio de Geoportales, servicios WMS, IDEs etc.)

En la Figura 15 se muestra un esquema con las fases identificadas anteriormente.

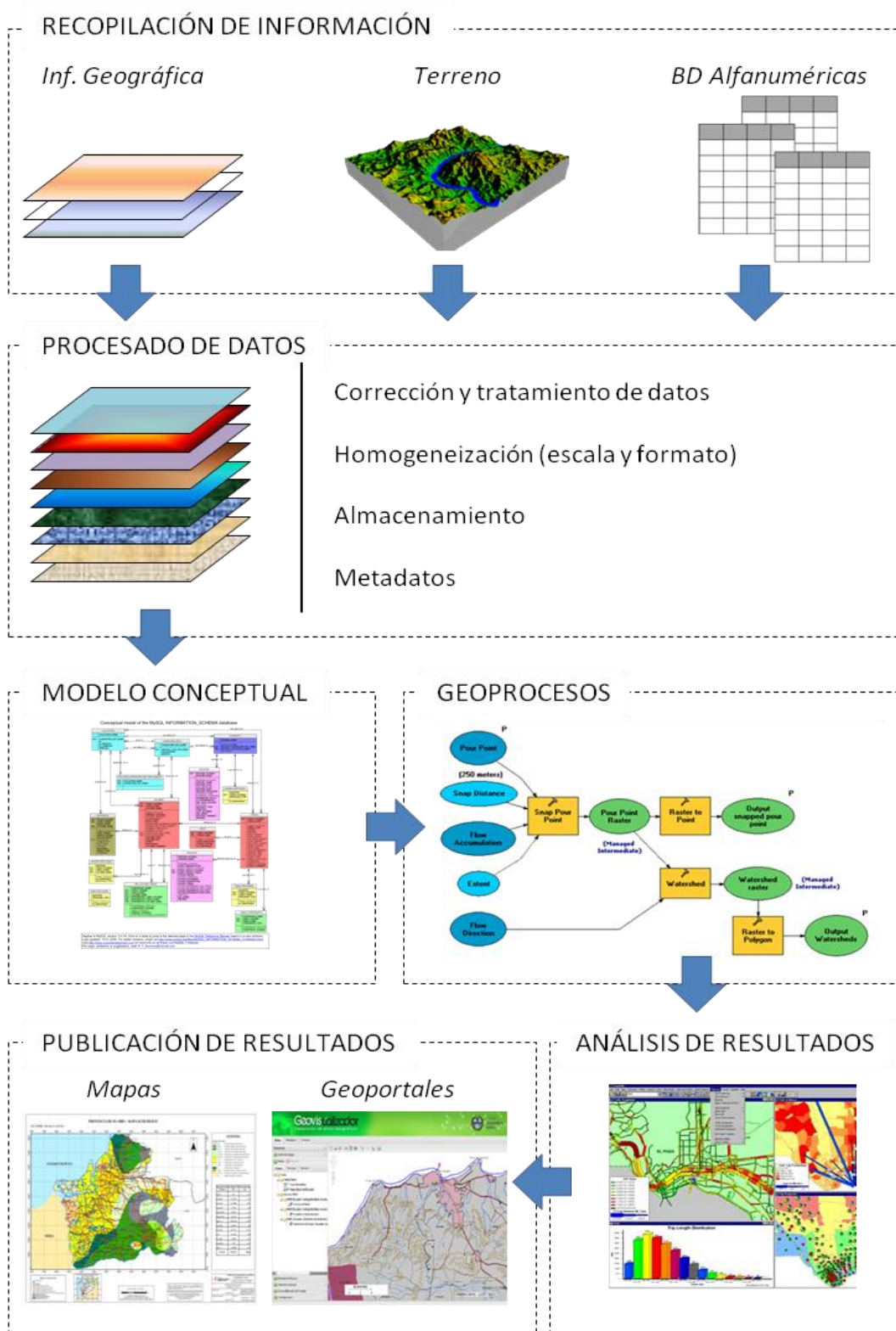


Figura 15. Esquema de las fases de un Sistema de información Geográfica.

Con respecto al uso de los SIG en los estudios de riesgo sísmico, en este caso concreto, se requiere la conformación de una base de datos, que sea georreferenciada para que almacene, edite y analice un gran volumen de información referente a los elementos de un evento sísmico. Estos son fundamentalmente el parque inmobiliario, necesario para cuantificar la exposición y la vulnerabilidad de las estructuras, y la determinación de aceleraciones e intensidades para determinar la peligrosidad, además de la integración de la vulnerabilidad, peligrosidad y exposición, para obtener el riesgo.

En la literatura se encuentra trabajos en los que los Sistemas de Información Geográfica es la herramienta clave para la estimación del riesgo sísmico (véase apartado de antecedentes).

2.4.2 El SIG diseñado en el estudio

Para la realización de un estudio en el que interactúan diferentes variables espaciales, como es el caso que nos ocupa, es imprescindible dar a todas ellas una correcta ubicación geográfica. Por ese motivo, el SIG diseñado en este estudio se considera la herramienta óptima para la elaboración, análisis y presentación de resultados. Además, aporta una base cartográfica precisa donde situar los resultados de las diferentes fases de este estudio (peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo) y así, facilitar la interpretación e interrelación.

2.4.2.1 Objetivos específicos del SIG

Los objetivos específicos del SIG se establecen a partir de la identificación de qué preguntas queremos responder en este estudio. Atendiendo a esta premisa y de acuerdo con los objetivos de este trabajo se fijaron las siguientes preguntas:

En referente a los resultados del estudio de exposición:

- ¿Cuántas edificaciones hay en la zona de estudio y cuál es su distribución geográfica? Número de edificaciones en cada sector.
- ¿En qué año fueron construidas las edificaciones?
- ¿Cuántas edificaciones de mampostería y hormigón armado hay en la zona de estudio y cuál es su distribución geográfica?

- ¿Cuál es el estado de conservación, número de pisos, condición física y uso topográfico en cada edificación?

En referencia a los resultados del estudio en peligrosidad:

- ¿Qué aceleración (PGA) se espera en ambos escenarios para el emplazamiento?
- ¿Qué intensidad macrosísmica puede esperarse en la zona de estudio debido a ambos escenarios?

En referencia a los resultados del estudio de vulnerabilidad:

- ¿Cuál es el índice de vulnerabilidad final para cada tipo de construcción?
- ¿Cuál es la distribución geográfica de las edificaciones usando el criterio de índice de vulnerabilidad?

En referencia a los resultados del estudio de riesgo sísmico:

- ¿Qué porcentaje de edificios con daño (nulo, leve, moderado, severo, extensivo y colapso) tiene cada una de las zonas urbanas para cada intensidad e índice de vulnerabilidad en cada escenario?
- ¿Qué número total de edificios inhabitables hay para cada escenario de peligrosidad?

2.4.2.2 Información de partida

Para la realización del SIG se tomarán como datos de partida:

- Catastro digital a escala 1:1000 actualizado hasta enero del 2015.
- División de zonas del cantón Rumiñahui a escala 1:1.000.
- Representación parroquial a escala 1:5.000
- Ecuador digital a escala 1:4.500.000

Datos alfanuméricos:

- Tabla (Excel) que contiene el parque inmobiliario de las zonas urbanas del cantón Rumiñahui.

2.4.2.3 Unidad de trabajo

Para poder diseñar la base de datos, lo primero que se debe fijar es la unidad geográfica mínima de trabajo como centro de toda su estructura, que debe estar acorde con el rango espacial del estudio, la escala de los datos de partida y la temática. Puesto que el estudio de riesgo abarca las zonas urbanas del cantón Rumiñahui y teniendo en cuenta los objetivos y escala de trabajo, en primera instancia se decide trabajar con la unidad de trabajo las construcciones. No obstante, para la representación gráfica (mapas) se usarán predios, el sector y la zona (catastro), de acuerdo a las variables que se analicen (Figura 16).

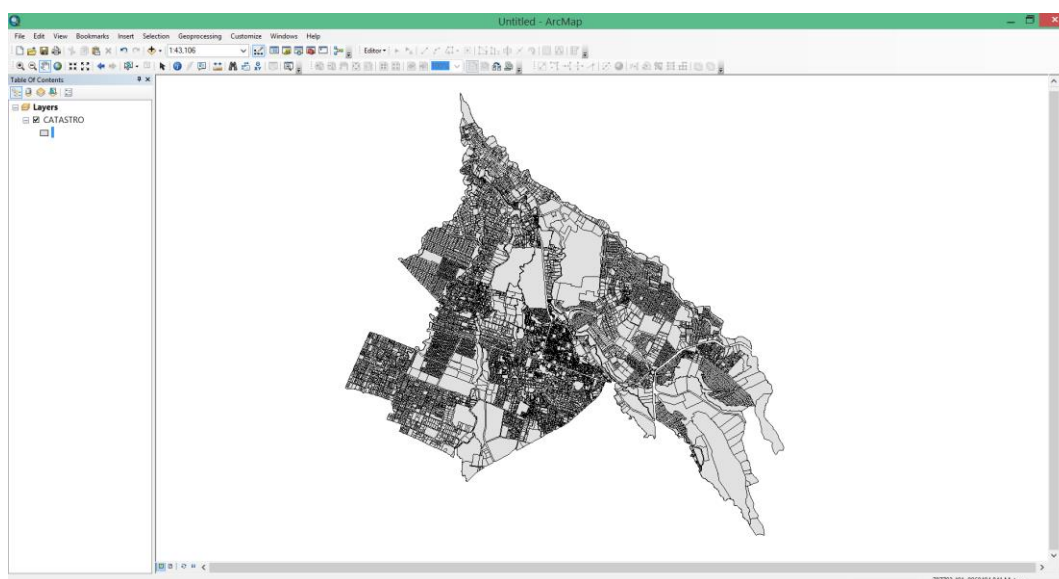


Figura 16. Unidades geográficas mínimas de trabajo que se considerarán en el estudio.

2.4.2.4 Sistema de referencia y proyecciones cartográficas

En este estudio, se utilizará el sistema de referencia World Geodetic System WGS-84 (Figura 17), este sistema de referencia global terrestre, empleado ampliamente a nivel mundial y obtenido a través de observaciones satelitales, se emplea desde 1987 para referenciar las posiciones y vectores.

Se define como un sistema cartesiano geocéntrico del siguiente modo:

- Origen, centro de masas de la Tierra, incluyendo océanos y atmósfera.
- Eje Z paralelo a la dirección del polo CIO o polo medio definido por el BIH, época 1984.0 con una precisión de 0,005".

- El eje X es la intersección del meridiano origen, Greenwich, y el plano que pasa por el origen y es perpendicular al eje Z, el meridiano de referencia coincide con el meridiano cero del BIH en la época 1984.0 con una precisión de 0,005". Realmente el meridiano origen se define como el IERS Reference Meridian (IRM).
- El eje Y ortogonal a los anteriores y pasan por el origen.
- Terna rectangular dextrosom.

Instituto Geográfico Nacional (IGN)

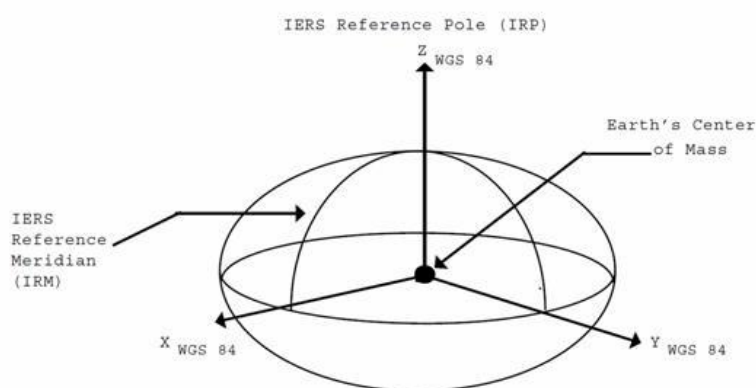


Figura 17. Sistema de referencia geocéntrico WGS84

Para representar cartográficamente los resultados, se emplean dos proyecciones cartográficas.

UTM. La proyección UTM (Universal Transverse Mercator) es un sistema de proyección cartográfica, universalmente aceptado y utilizado, basado en cuadrículas (Figura 18). Las premisas más relevantes de esta proyección se enumeran a continuación:

- Uso de un falso este para impedir la aparición de coordenadas X negativas, sumando 500.000 metros.
- Uso de un falso norte en las coordenadas del hemisferio sur para impedir que aparezcan coordenadas Y negativas, sumando 10.000.000 metros a la coordenada Y.
- Uso de diferentes meridianos centrales en función de la zona a representar. La tierra se divide en 60 husos de 6° de longitud

- Empleo de un factor de reducción de escala de 0.9996 para reducir la deformación lineal.

En este caso, se empleará el huso 17 (con longitud del meridiano central de -81°) y el hemisferio Sur.

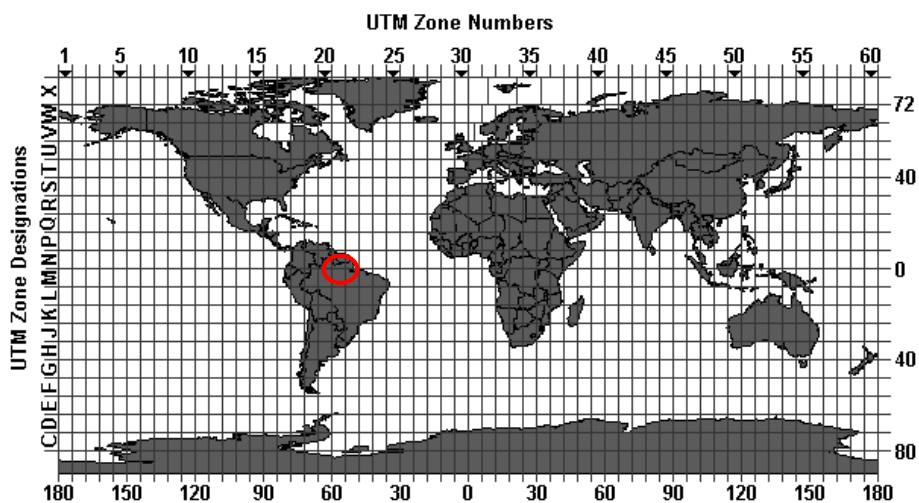


Figura 18. Representación geográfica de la proyección UTM.

TM E012. Esta proyección se basa en el principio de la proyección UTM, pero presenta algunas modificaciones para minimizar las deformaciones. Concretamente, se desplaza en falso este, sumando a la coordenada X 778.275 metros, se emplea como meridiano central el de longitud -78.5 y se aplica un factor de reducción de escala de 1.0004584.

En la Figura 19 se muestran los parámetros asociados a estas proyecciones.

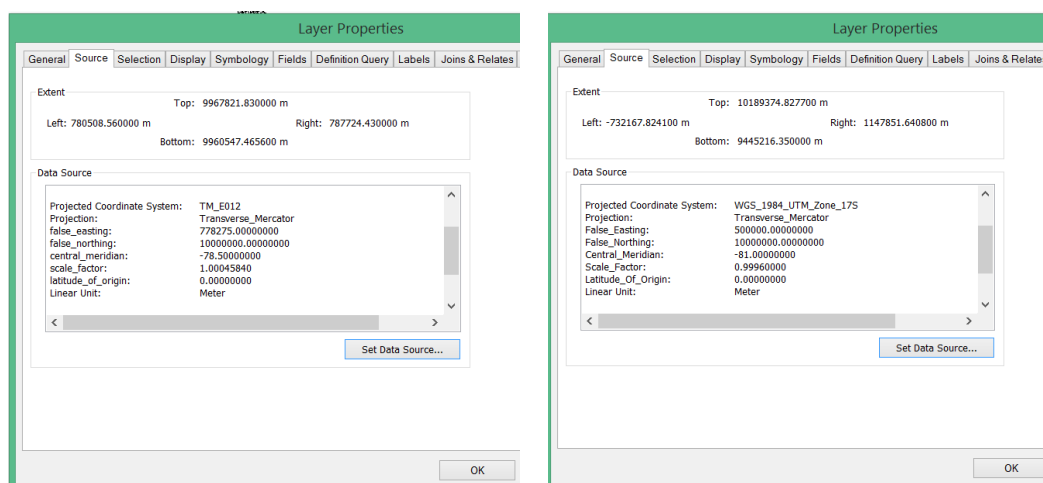


Figura 19. a) Características de la proyección UTM 17S. b) Características de la proyección TM_E012.

2.4.2.5 Herramienta

El software que se empleará para la elaboración y construcción del Sistema de Información Geográfica es ArcGIS v 10.1, es un producto de la empresa ESRI (*Enviromenta System Research Institute*). Este conjunto de programas permite realizar todos los procesos del Sistema de Información Geográfica en un mismo entorno, desde la captura de datos, edición de los mismos y sobre todo el análisis de las variables hasta llegar finalmente a la producción cartográfica.

Las aplicaciones que se emplearán con mayor fuerza son:

- ArcCatalog: Aplicación compartida de ArcGIS que permite organizar y acceder a toda la información almacenada de un SIG, como mapas, datasets, modelos y metadatos.
- ArcMap: Aplicación de ArcGIS Desktop (ArcInfo) que permite crear mapas de una manera sistemática. Es la aplicación clave para todas las tareas relacionadas con mapas, incluyendo claro la cartografía, análisis de mapas y edición.

CAPITULO III

3 APLICACIÓN AL CANTÓN RUMIÑAHUI

3.1 ZONA DE ESTUDIO

El cantón Rumiñahui, calificado como cantón el 31 de mayo de 1983 (antes era considerado una parroquia de Quito), se localiza en el Valle de los Chillos a 2550 metros sobre el nivel del mar y es una de los ocho cantones que conforman la Provincia de Pichincha (PDOT, GADMUR 2012). Su cabecera cantonal es la Parroquia Urbana Sangolquí, actualmente considerada como una de las urbes con un desarrollo continuo en el país, ya que su población se incrementó comparada con el último censo nacional (Figura 20) a 85.852 habitantes y su tasa de crecimiento varió a 2.94 (INEC 2014).

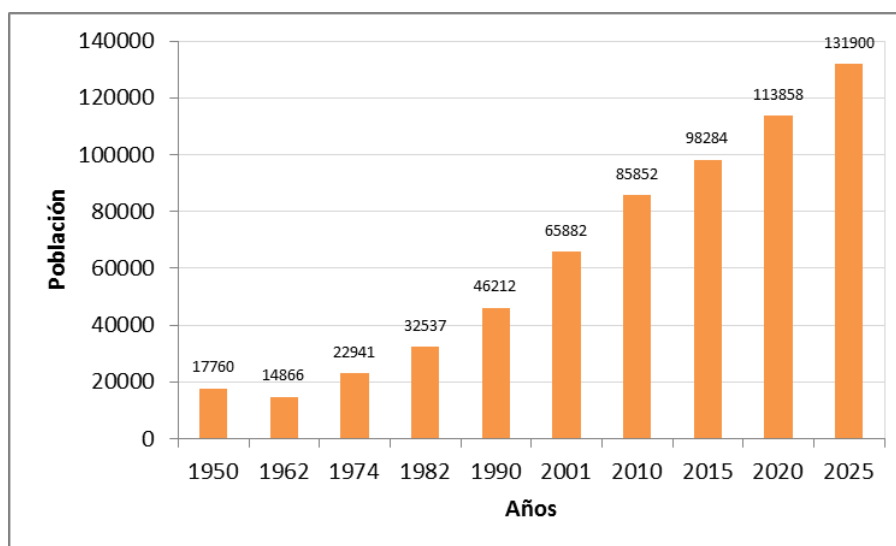


Figura 20. Crecimiento poblacional. Fuente: PDOT del cantón Rumiñahui

En la Figura 21 se indica la ubicación del cantón Rumiñahui, este se encuentra constituido por dos parroquias rurales, Cotogchoa y Rumipamba, y tres parroquias urbanas, Sangolquí, San Pedro de Taboada y San Rafael (GADMUR 2012). El cantón Rumiñahui, con una extensión de 135,7 km² se encuentra limitado de la siguiente manera:

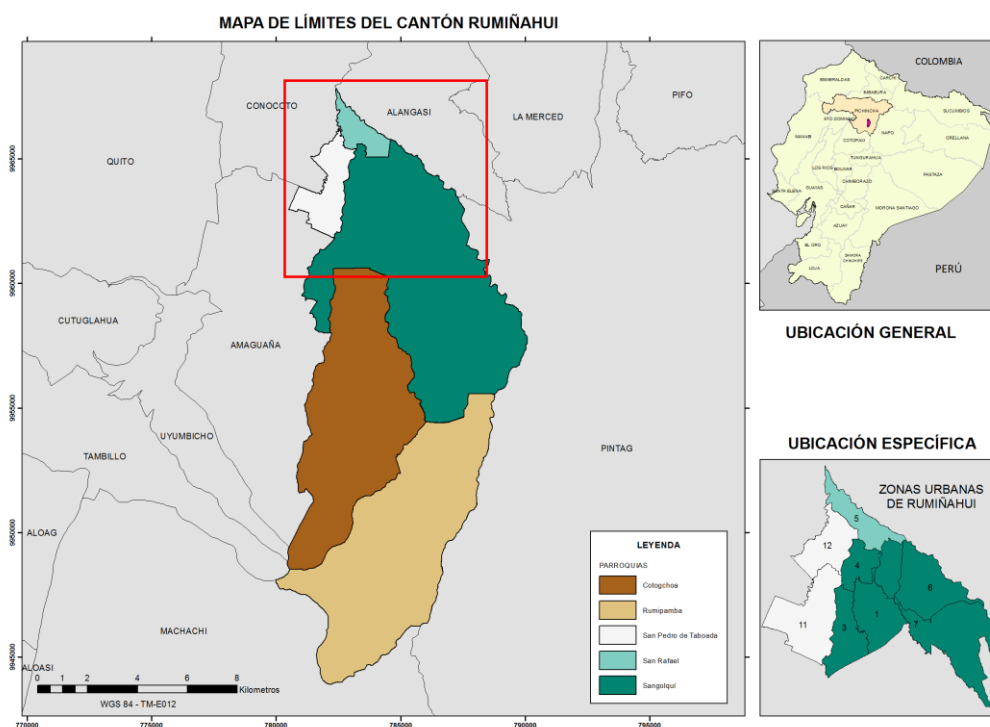


Figura 21. Límites del cantón Rumiñahui.

La ciudad de Quito y sus valles (incluido en cantón Rumiñahui) están a merced de sismos severos de subducción, con hipocentro en el callejón interandino, y sismos con foco superficial al este de la ciudad, cercanos a las estribaciones de la cordillera oriental. En sus 460 años de historia sísmica, la ciudad experimentó intensidades superiores a VI en más de 25 ocasiones. Los eventos ocurridos en los años 1587, 1755, 1797, 1868, 1938 y 1949 (el más severo) con focos ubicados sobre fallas en el callejón interandino produjeron intensidades incluso mayores a VII (Yépez et al. 1993).

En el sismo del 9 de Agosto de 1938, los sismógrafos del observatorio astronómico registraron desde las tres de la mañana una serie de temblores que culminaron con un sismo de magnitud 7.1 a las 21:00h, localizado en el cantón Rumiñahui, con un epicentro calculado a unos 20 kilómetros en dirección sur-este, ubicado en las cercanías de El Tingo y Alangasí donde tanto la población como la infraestructura resultaron completamente destruidas. En Sangolquí y Conocoto en menor escala de destrucción pero con daños muy graves. (Barona 2010).

3.2 ESCENARIOS DE AMENAZA SÍSMICA DETERMINISTAS

Como se menciona anteriormente, la estimación de la amenaza sísmica en este trabajo se aborda desde la metodología determinista identificando dos escenarios sísmicos probables que puedan afectar al cantón.

3.2.1 Identificación de los escenarios sísmicos

La selección de estos dos escenarios viene dada por las características tectónicas de Ecuador, donde, como ya se mencionó, la amenaza sísmica está condicionada por una convergencia de placas que genera sismos de diferente naturaleza y magnitud en todo el país.

Para cubrir esa amenaza diversa, se considera importante establecer dos supuestos. Un primer escenario asociado al régimen de subducción interfase, donde se producen terremotos de gran magnitud aunque alejados del cantón, y un segundo escenario asociado al régimen de cortical, donde se producen terremotos de menos magnitud pero más próximos al cantón.

En la Figura 22 se muestran las dos zonas sísmicas que son analizadas en este trabajo.

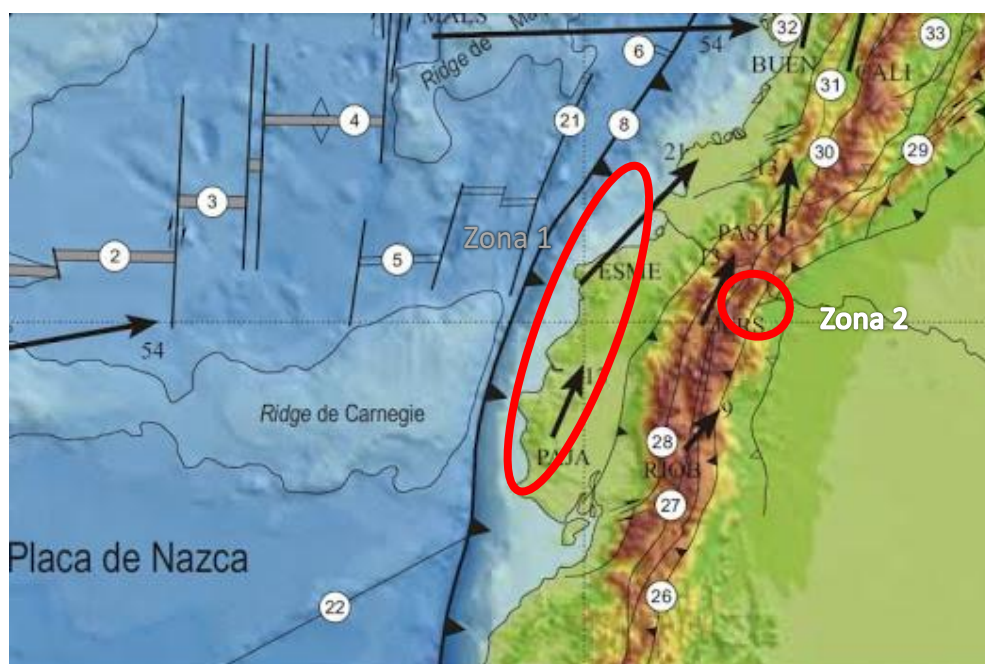


Figura 22. Zonas sísmicas de Ecuador consideradas para definir los dos escenarios

3.2.1.1 Escenario 1 de amenaza.

La región de subducción interfase del Ecuador lleva asociada los mayores sismos registrados en el país desde que se tiene memoria, claro ejemplo de ello son los sismos ocurridos en las costas como en Esmeraldas en 1906 (M8.8) y 1976 (M6.7), en Valdez-Esmeraldas en 1979 (M7.7), en Salinas en 1981 (M6.4) y en Bahía de Caráquez en 1998 (M7.2).

Para este trabajo, y puesto que se trata de evaluar escenarios potencialmente extremos, se tomó como Escenario 1 de amenaza la reproducción de un sismo similar al ocurrido en Esmeraldas el 31 de enero de 1906. Con una magnitud momento de 8.8, una profundidad de 18.8 km y un mecanismo inverso. Este sismo es uno de los 10 terremotos más grandes que se registró desde la época instrumental del mundo. En la Tabla 8 se muestran los datos de este terremoto tomados de la USGS (*United States Geological Survey*) y datos calculados a partir del modelo de subducción de Hayes (1971) que serán empleados para modelizar el plano de ruptura.

Tabla 8.

Parámetros del sismo que se emplearán para el Escenario 1 de amenaza.

| | | |
|---------------|----------------------|--------------------------------------|
| USGS | Localización XY | ϕ 0.955°N λ 79.369°W |
| | Profundidad Z | 18.8 km |
| | Magnitud | Mw 8.8 |
| Hayes, (1971) | Acimut | 30° |
| | Buzamiento | 18° |
| | Mecanismo | Inverso |

A partir de la magnitud del sismo se estableció el tamaño del plano de ruptura, para ello, se tomaron las ecuaciones empíricas propuestas por Leonard, 2010 para un sismo de interfase y de mecanismo inverso (Ecuación [8] y [9]) para estimar la longitud de la traza de ruptura y el área de ruptura potencial, respectivamente.

$$Mw = 1.67 * \log(L) + 4.24 \quad [8]$$

$$Mw = 1 * \log(A) + 4 \quad [9]$$

Con la longitud y el área se dedujo el ancho del plano de ruptura ($L*W=A$). En la Figura 23 se muestra el tamaño de dicho plano. Como se puede observar, las expresiones anteriores establecen una relación logarítmica entre la magnitud, la longitud y el área, por lo que un sismo de una magnitud tan elevada como éste, asocia un gran tamaño del plano de ruptura.

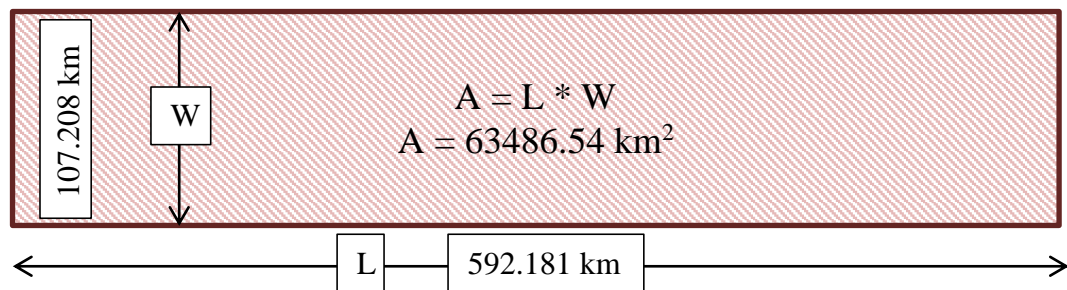


Figura 23. Tamaño del plano de ruptura del Escenario 1 de amenaza en función de la magnitud y las expresiones de Leonard, 2010.

Una vez establecido el tamaño del plano de ruptura, el siguiente paso es ubicarlo espacialmente, para ello se tuvo en cuenta las coordenadas epicentrales, la profundidad y los dos ángulos que definen el plano de falla (acimut y buzamiento). En la Figura 24 se muestra el plano de ruptura modelado para este escenario.

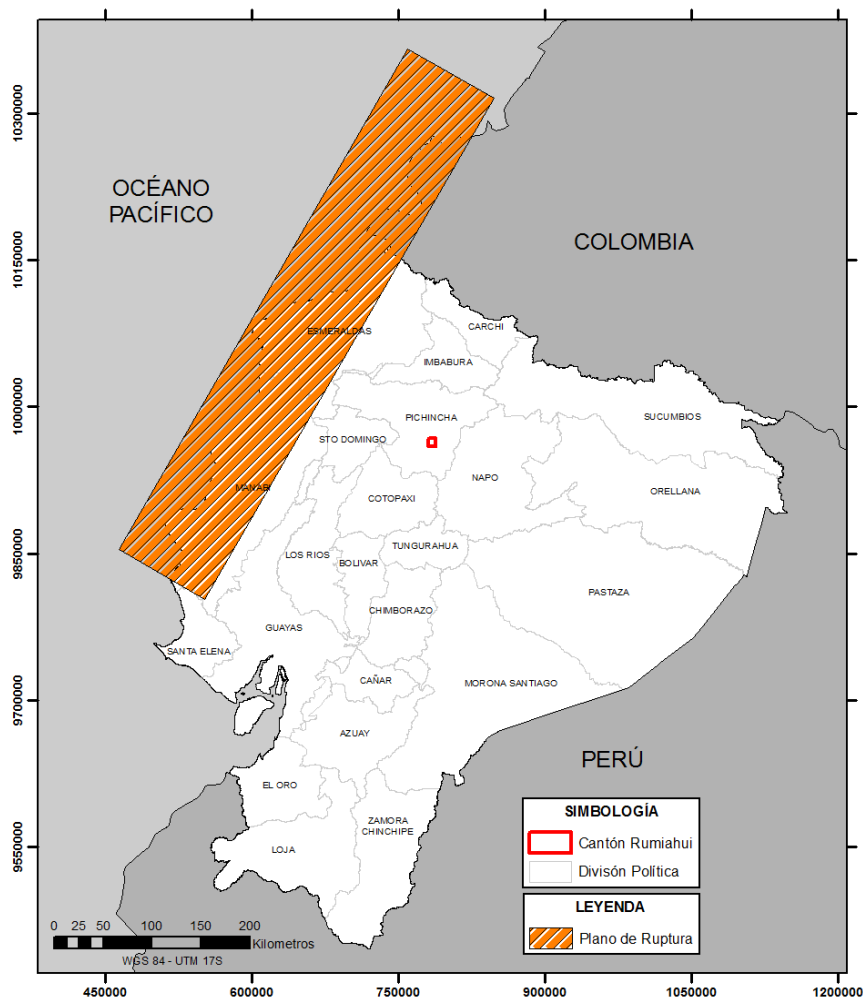


Figura 24. Plano de ruptura asociado al Escenario 1 de amenaza.

3.2.1.2 Escenario 2 de amenaza.

Si se analizan las fallas próximas al cantón Rumiñahui asociadas a un régimen de cortical, se detecta que aproximadamente a 13 km del cantón se encuentra el sistema de fallas ciegas de Quito, este sistema cuenta con 5 segmentos distribuidos a lo largo de la ciudad.

El sistema de fallas de Quito (QFS) se extiende más de 60 km a lo largo de la depresión interandina en el norte de Ecuador. Este sistema de fallas está compuesto por un conjunto de fallas, cuya proyección en superficie (rectángulos amarillos en la Figura 25, que corresponden, de sur a norte, a los segmentos de: Puengasí; Ilumbisí-La Bota (ILB); Carcelén-El Inca (CEI); Bellavista-Catequilla (BC); y Tangahuilla.) coincide, en un 70% aproximadamente, con el núcleo urbano de Quito, tal y como indica Alvarado et al. 2014. Esto convierte a la capital de los ecuatorianos y sus

alrededores en una zona con un alto grado de peligrosidad sísmica. Para ello basta ver los epicentros de los sismos asociados a estas fallas en la Figura 25.

Los sismos asociados a estas fallas ciegas cercanas son de tipo impulsivo, tienen una profundidad focal superficial, son de poca duración pero con un poder destructivo alto debido al efecto de campo cercano (Rivas-Medina, 2014).

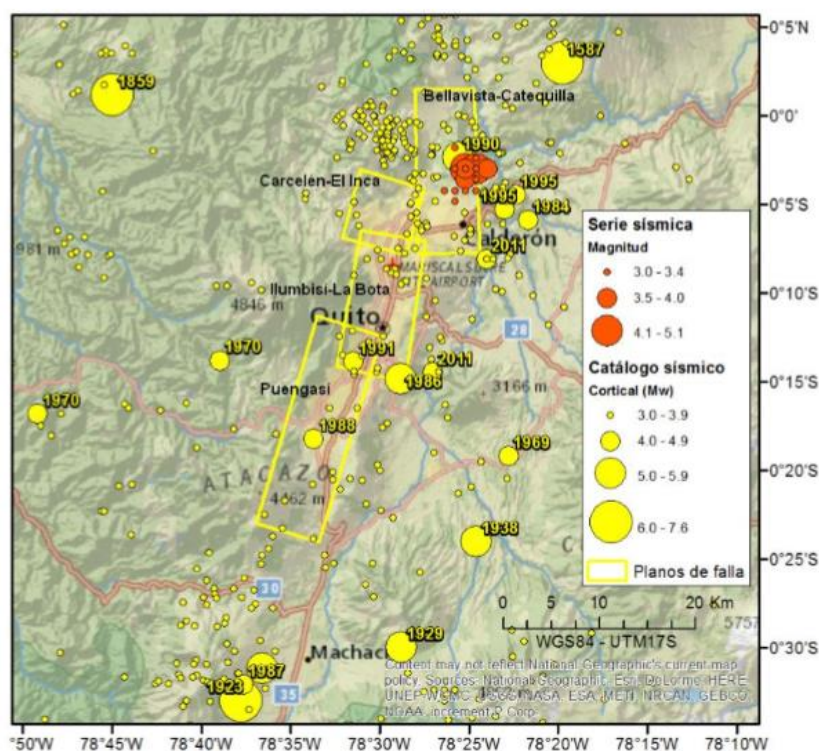


Figura 25. Segmentos de la falla ciega de Quito. Fuente: Rivas-Medina (2014)

Para este segundo escenario de amenaza, se considera un sismo asociado a este sistema de fallas, concretamente en el segmento más al sur, el segmento – Puengasí, por ser el más próximo al cantón Rumiñahui. Este segmento ya generó en el pasado un evento sísmico el 12 de abril de 1988, con una magnitud momento de 4.2 a poca profundidad.

Algunos trabajos, como el publicado en Rivas – Medina et al. 2014, determinan que el segmento de falla de Puengasí, de acuerdo al tamaño de dicho segmento, puede generar sismos de magnitud máxima de 6.4 (siendo este un sismo poco probable y con un periodo de retorno entre 1224 – 2190 años), para este Escenario 2 de amenaza, se seleccionó una magnitud menor (magnitud momento 6.0) pero que

lleva asociada un periodo de recurrencia más pequeño (262 años aproximadamente) (Tabla 9), lo que lo convierte en un sismo de gran probabilidad de ocurrencia en los próximos años.

Tabla 9.

Periodos de recurrencia asociados a distintas magnitudes de los segmentos de GFS. Fuente: Rivas-Medina et al. 2014

| Rango de magnitudes | Periodo de recurrencia (años) | | | | |
|---------------------|-------------------------------|-----------|-----------|------------|-------------|
| | Puengasí | ILB | CEI | BC | Tangahuilla |
| [5,0 – 5,5) | 20 – 35 | 18 – 30 | 27 – 39 | 18 – 31 | 23 – 34 |
| [5,5 – 6,0) | 62 – 87 | 56 – 75 | 85 – 130 | 58 – 78 | 65 – 97 |
| [6,0 < | 164 – 262 | 179 – 279 | | 169 – 279 | 579 – 1016 |
| Mmáx. | 1224 – 2190 | 610 – 981 | 549 – 952 | 908 – 1630 | 579 -1016 |
| | (Mw 6,4) | (Mw 6,2) | (Mw 5,9) | (Mw 6,3) | (Mw 6) |

En la Tabla 10 se muestran los parámetros que se toman en cuenta para modelizar este terremoto de acuerdo a los valores publicados en la USGS, Alvarado et al. 2014 y Rivas-Medina et al. 2014.

Tabla 10.

Parámetros del sismo que se emplearán para el Escenario 2 de amenaza.

| | | |
|----------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|
| USGS | Localización Geográfica | ϕ 0.311°S λ 78.529°W |
| | Profundidad Z | 5 km |
| Alvarado et al. (2014) | Acimut | 183° |
| | Buzamiento | 45° |
| | Mecanismo | Inverso |
| Rivas-Medina et al. (2014) | Magnitud | Mw 6.0 |

Como en el caso del Escenario 1 de amenaza, a partir de la magnitud del evento, el régimen tectónico y el mecanismo (falla inversa) se identifica el tamaño del plano de ruptura de acuerdo a las ecuaciones propuestas por Leonard, 2010, siendo estas las mismas empleadas en el escenario 1 de amenaza.

Del mismo modo, con la longitud y el área se dedujo el ancho del plano de ruptura. En la Figura 26 se muestra el tamaño de dicho plano. Como se puede observar, el tamaño del plano de ruptura de este segundo escenario tiene una dimensión muy por debajo de las obtenidas en el primer escenario, esto es debido a la diferencia de magnitudes entre ambos.

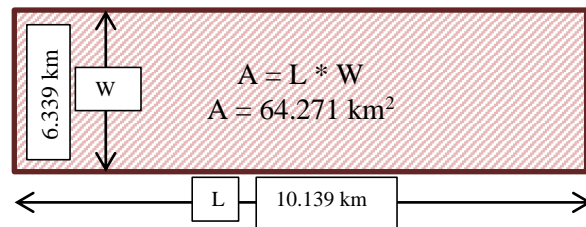


Figura 26. Tamaño del plano de ruptura del Escenario 2 de amenaza en función de la magnitud y las expresiones de Leonard 2010.

Una vez establecido el tamaño del plano de ruptura, el siguiente paso, como en el caso anterior, es ubicarlo espacialmente, para ello se tuvo en cuenta las coordenadas epicentrales, la profundidad y los dos ángulos que definen el plano de falla (acimut y buzamiento). En la Figura 27 se muestra el plano de ruptura modelado para este escenario.

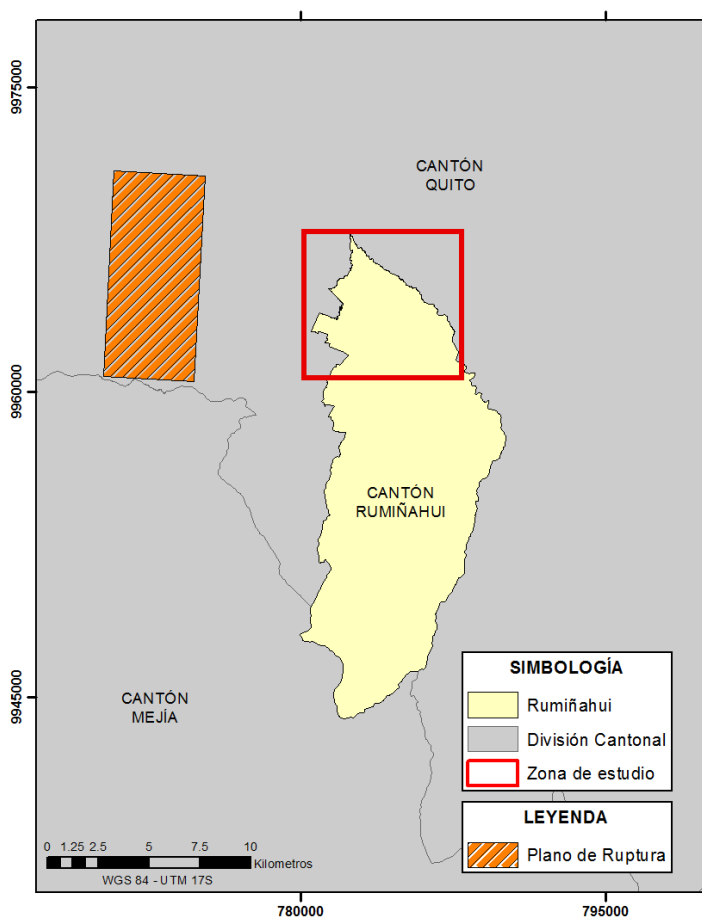


Figura 27. Plano de ruptura asociado al Escenario 2 de amenaza.

3.2.2 Estimación de las aceleraciones máximas esperadas

Para modelizar las aceleraciones máximas esperadas asociadas a los dos escenarios sísmicos, tal y como se indicó en el apartado metodológico, se aplicó un modelo de predicción de movimiento fuerte empírico.

Para seleccionar el modelo adecuado de todos los que ofrece la literatura, se establecieron previamente las condiciones de contorno de la zona de estudio previamente. En este caso, se necesita un modelo desarrollado para un régimen tectónico de subducción interfase y cortical, para terrenos volcánicos y desarrollados a partir de una gran base de datos para asegurar la robustez de los resultados. De todos los modelos analizados Kanno et al. (2006) Lin and Lee (2008) McVerry et al. (2006) Youngs et al. (1997) Zhao et al. (2006) Atkinson and Macias (2009) Garcia et

al. (2005). El modelo de Zhao et al. 2006, es el que cubre todas las demandas, se trata de un modelo desarrollado a partir de 269 terremotos y 4518 registros obtenidos en Japón (cuyas características sismotectónicas son similares a las de Ecuador).

3.2.2.1 Modelo de movimiento fuerte

La expresión que estima la aceleración se presenta en las ecuaciones [10] y [11].

$$\ln(A) = a * Mw + b * x - \ln(r) + e(h - hc)\delta h + Fr + Si + Ss + Ssl * \ln(x) + Ck + \sigma \quad [10]$$

$$r = x + c^{d*Mw} \quad [11]$$

Donde, A corresponde a la aceleración estimada, expresada en cm/s^2 , Mw es la magnitud momento, x es la distancia del emplazamiento al plano de ruptura, h es la profundidad del plano de ruptura, hc es una profundidad fija del modelo, estimada en 15 km, δh toma el valor de 0 si $h < hc$ y 1 al contrario, Fr es una constante que se debe introducir para sismos de cortical y mecanismo inverso, Si para sismos de subducción interfase, Ss y Ssl para sismos de subducción superficial, Ck es un parámetro referente al tipo de suelo, a , b , c , d y e son coeficientes de ajuste del modelo (tomará diferentes valores en función de la aceleración espectral que se estime con el modelo Tabla 11) y σ es la desviación estándar.

Tabla 11.
Coeficientes del modelo de Zhao et al. 2006

| Período | a | b | c | d | e | FR | SI | SS | SSL |
|-------------|-------|----------|--------|-------|---------|-------|--------|-------|--------|
| PGA | 1.101 | -0.00564 | 0.0055 | 1.080 | 0.01412 | 0.251 | 0.000 | 2.607 | -0.528 |
| 0.05 | 1.076 | -0.00671 | 0.0075 | 1.060 | 0.01463 | 0.251 | 0.000 | 2.764 | -0.551 |
| 0.1 | 1.118 | -0.00787 | 0.0090 | 1.083 | 0.01423 | 0.240 | 0.000 | 2.156 | -0.420 |
| 0.15 | 1.134 | -0.00722 | 0.0100 | 1.053 | 0.01509 | 0.251 | 0.000 | 2.161 | -0.431 |
| 0.2 | 1.147 | -0.00659 | 0.0120 | 1.014 | 0.01462 | 0.260 | 0.000 | 1.901 | -0.372 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 3 | 1.759 | -0.00147 | 0.0032 | 1.025 | 0.00644 | 0.307 | -0.331 | 1.037 | -0.263 |
| 4 | 1.826 | -0.00195 | 0.0040 | 1.044 | 0.00590 | 0.353 | -0.390 | 0.561 | -0.169 |
| 5 | 1.825 | -0.00237 | 0.0050 | 1.065 | 0.00510 | 0.248 | -0.498 | 0.225 | -0.120 |

Para este trabajo, se estima la media de la aceleración de PGA (aceleración pico), que corresponde con la aceleración del suelo.

El efecto de sitio se incorpora por medio del modelo según el tipo de suelo de la zona de estudio, en este caso, se considera un suelo tipo D de la NEC11. La NEC11 es la actualización del CEC 2000, de donde Baraona 2010 indica que el tipo de suelo del emplazamiento es S2, migrando la información a la actualidad se ve que el suelo tipo D es la actualización del suelo tipo S2, por las características analizadas.

El tipo de suelo D corresponde con un suelo SCIII en el modelo de Zaho et al. 2006, al que le corresponde un coeficiente de 1.355 para estimar la aceleración PGA.

Tabla 12.

Clasificación del suelo del modelo de Zhao et al. 2006.

| Site Class | Description | Natural Period | V ₃₀ Calculated from Site Period | NEHRP Site Classes |
|------------------|-------------|-------------------|---|--------------------|
| Hard rock | | | V ₃₀ > 1100 m/s | A |
| SC I | Rock | T < 0.2 sec | V ₃₀ > 600 m/s | A + B |
| SC II | Hard soil | 0.2 = T < 0.4 sec | 300 m/s < V ₃₀ = 600 m/s | C |
| SC III | Medium soil | 0.4 = T < 0.6 sec | 200 m/s < V ₃₀ = 300 m/s | D |
| SC IV | Soft soi | T = 0.6 sec | V ₃₀ = 110 m/s | E + F |

De este modo, y en función de las características del sismo que se genere en cada escenario, se ajusta el modelo de predicción de movimiento fuerte para cada caso.

Las ecuaciones [12] y [13] corresponden los modelos ajustados para el Escenario 1 y 2, respectivamente, de amenaza.

$$\ln(A) = 1.101 * Mw - 0.00564 * x - \ln(r) + 0.01412 (h - 15) + 0.000 + 1.355 \quad [12]$$

$$\ln(A) = 1.101 * Mw - 0.00564 * x - \ln(r) + 0.251 + 1.355 \quad [13]$$

3.2.2.2 Implementación con el SIG

Para implementar este cálculo en el SIG, se desarrollaron 4 pasos.

- Paso 1: Se crea un plano 3D correspondiente al plano de ruptura (por medio de las coordenadas de los cuatro vértices del plano)

- Paso 2: Se genera una malla regular de puntos donde se estima la aceleración. Antes de llegar a estimar dicha aceleración hay que calcular la distancia 3D de cada punto de la malla al plano de ruptura.
- Paso 3: Con las distancias 3D estimadas (distancias al plano de ruptura), se hace una interpolación lineal y se obtiene una capa ráster de distancias 3D.
- Paso 4: Se implementa la ecuación de predicción de movimiento fuerte por medio de la calculadora ráster, donde la única variable es la Distancia 3D.

En la Figura 28 se muestra un diagrama de flujo con los pasos seguidos, las capas de entrada y salida y las herramientas empleadas. Este proceso se desarrolla para los dos escenarios.

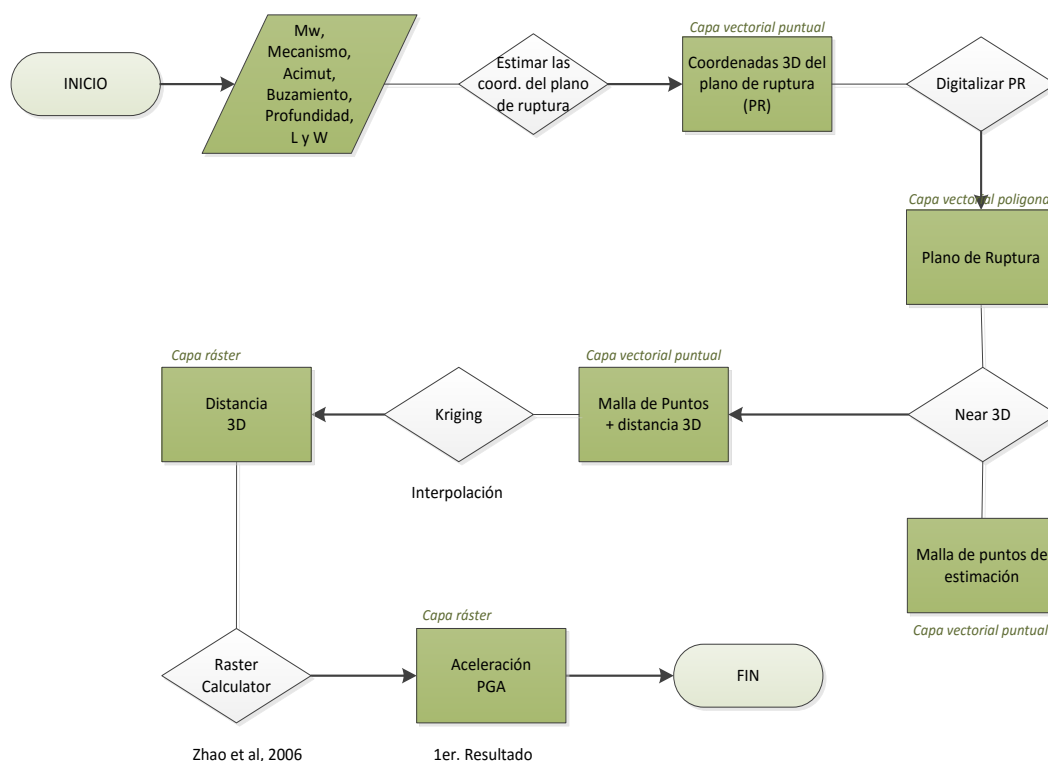


Figura 28. Diagrama de flujo con la estimación de las aceleraciones esperadas.

3.2.3 Estimación de las intensidades máximas esperadas

Una vez obtenida la aceleración para cada escenario, el siguiente paso es estimar las intensidades asociadas a dichas aceleraciones.

Son varias las expresiones que ofrece la literatura para hacer dicha transformación Trifunac 1975, Murphy 1977, Lomnitz 1974, Saragoni 1982 y Gómez 2002 entre otros, de todas las anteriores, la que publica Saragoni 1982, y se ajusta con datos chilenos, se adapta a las características de nuestro emplazamiento.

3.2.3.1 Relación de aceleración – intensidad

En la Figura 29 se muestra un gráfico con la relación que se emplea en el estudio (Saragoni, 1982).

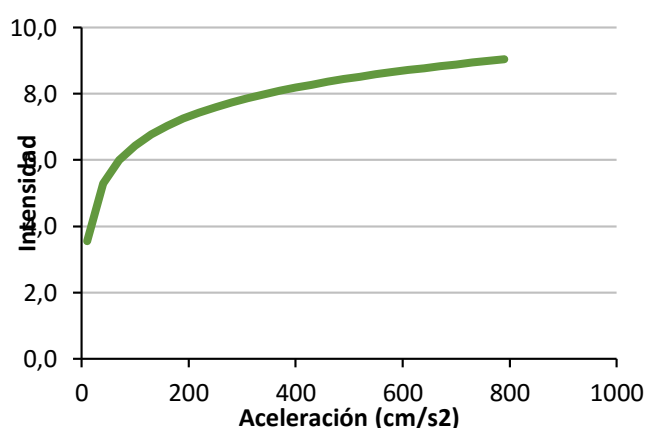


Figura 29. Relación entre la aceleración y la intensidad de Saragoni, 1982.

La ecuación [14] muestra la expresión de dicha relación.

$$\text{Log}(A) = 0.345(\text{Imm}) - 0.222 \quad [14]$$

Donde A corresponde a la aceleración en cm/s^2 e Imm corresponde a la intensidad.

3.2.3.2 Implementación con el SIG

Para implementar esta expresión con el SIG en la ecuación [14] se despeja la intensidad Imm y se emplea la calculadora ráster a partir de la capa ráster de aceleración que se obtuvo anteriormente. Este proceso se hace para los dos escenarios. En la Figura 30 se muestra el diagrama de flujo.

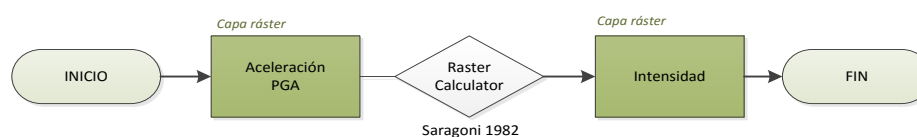


Figura 30. Diagrama de flujo desarrollado para obtener las intensidades teóricas.

3.2.4 Resultados

Una vez desarrollados los pasos anteriores, se obtuvo una modelización de la amenaza sísmica para los dos escenarios en términos de Intensidad macrosísmica teórica.

La Figura 31, muestra las aceleraciones e intensidades estimadas para el Escenario 1 de amenaza. Como se puede observar, las aceleraciones máximas esperadas se encuentran muy cerca del plano de ruptura, llegando de 793.3 cm/s^2 , en el caso del cantón Rumiñahui (ubicado con un recuadro rojo), al encontrarse más alejado del plano de ruptura, la aceleración media esperada es de 176.9 cm/s^2 . Con respecto a las intensidades, se estima que este terremoto genere una intensidad de VII en el cantón.

La Figura 32 muestra las aceleraciones e intensidades estimadas para el Escenario 2 de amenaza. Al tratarse de un sismo de menor magnitud, las aceleraciones máximas esperadas cerca del plano de ruptura son 413.8 cm/s^2 , en las zonas urbanas del cantón Rumiñahui alcanzan 242.8 cm/s^2 , coincidiendo con una intensidad promedio de VII-VIII en esa zona de estudio.

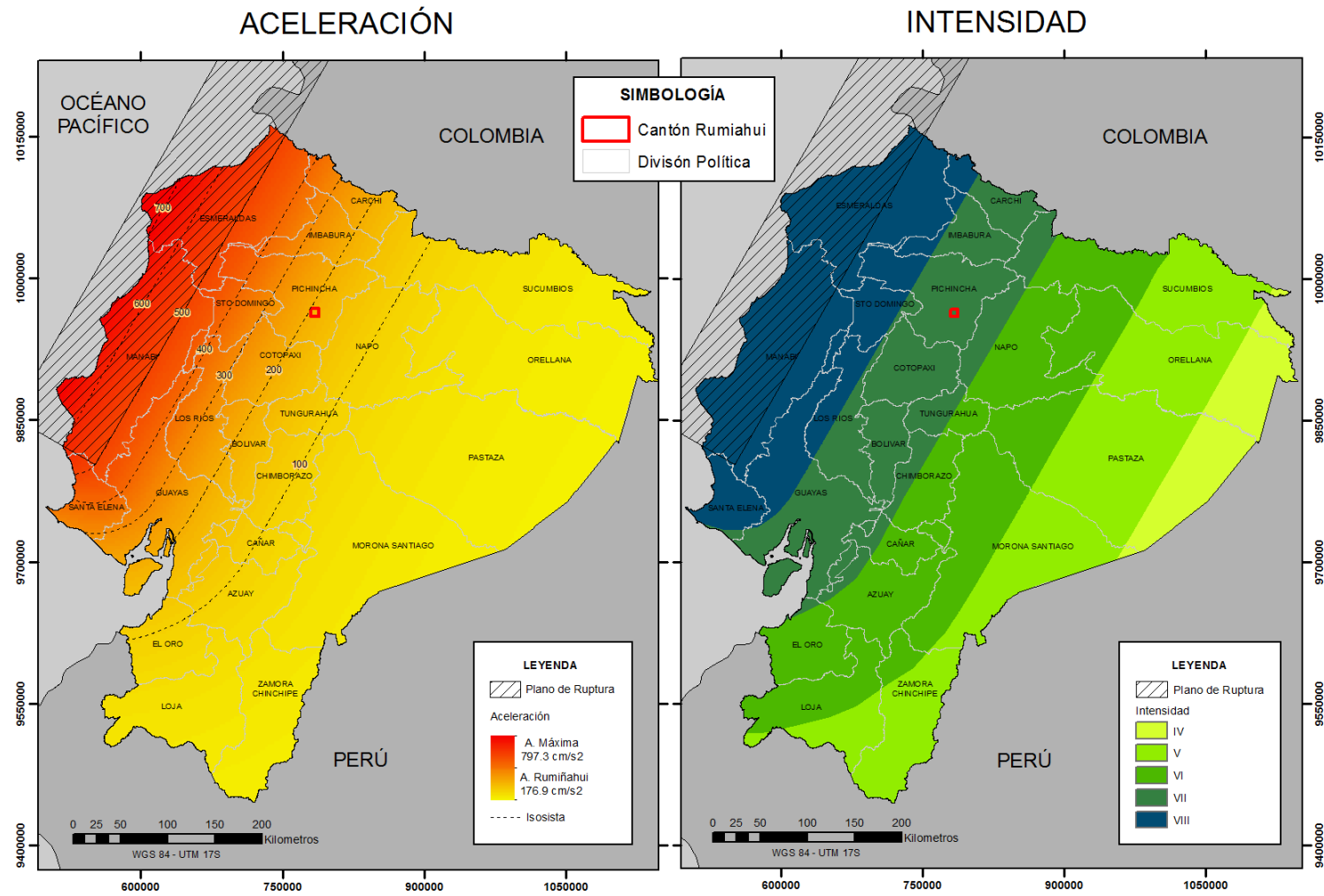


Figura 31. Mapa de Aceleración PGA (cm/s²e Intensidad Macrosísmica. Escenario Extremo.

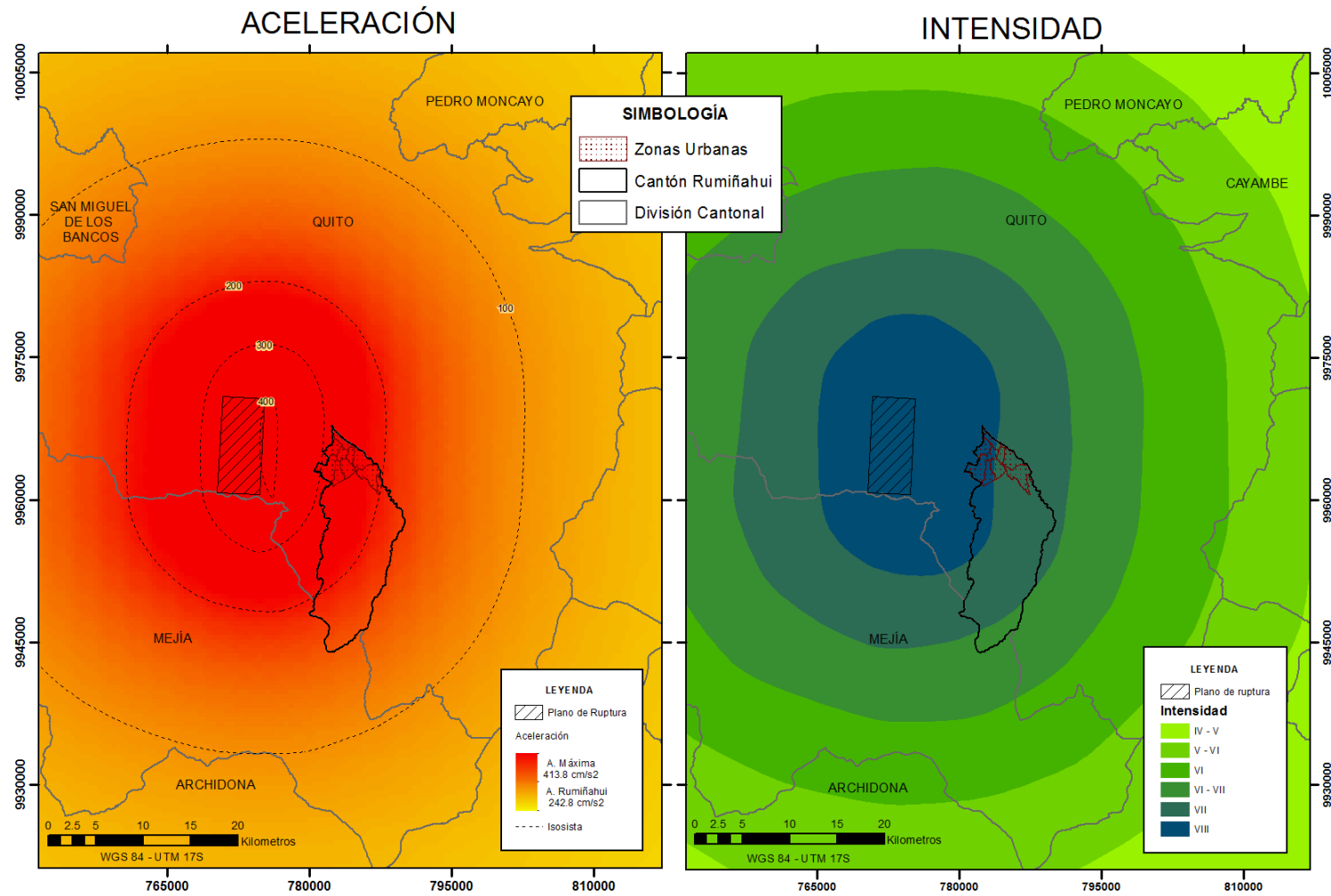


Figura 32. Mapa de Aceleración PGA (cm/s^2) e Intensidad Macrosísmica. Escenario Próximo.

3.3 EXPOSICIÓN DEL CANTÓN RUMIÑAHUI

3.3.1 Base de datos de partida

Estudiar la exposición en un estudio de riesgo sísmico supone cuantificar las estructuras que se verán afectadas por ese riesgo identificando las características fundamentales de las mismas.

Para desarrollar este tipo de análisis lo usual es contar con bases de datos catastrales y estadísticas de la zona de estudio. En este caso, se partió de la base de datos Catastral del cantón Rumiñahui facilitada por el Municipio, actualizada hasta enero del 2015 y referente a las zonas urbanas del mismo. Esa base de datos cuenta, como ya se mencionó en el apartado Datos de partida del SIG, con una capa vectorial (formato *.shp) con la representación geográfica de las unidades de división catastral (hasta el predio) y con una tabla (formato *.xlsx) con la información alfanumérica asociada a la división catastral de cada construcción (Figura 33).

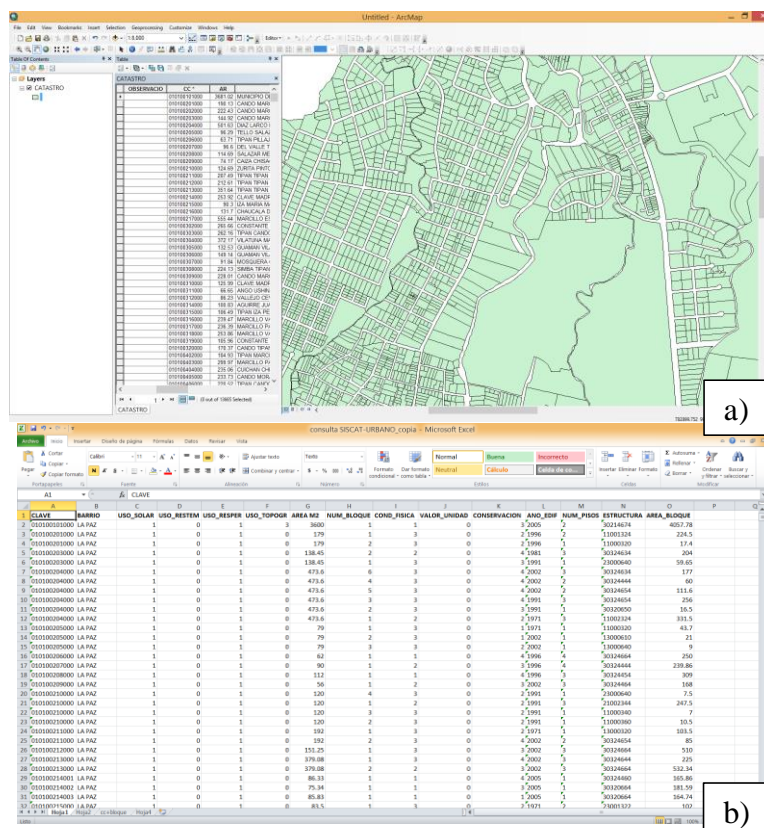


Figura 33. Vista de la información de partida catastral usada para caracterizar la exposición a) formato *.shape, b) formato *.xlsx.

3.3.1.1 Modelo conceptual

Para entender de forma estructurada el nivel de información del que se partió, en la Figura 34 se muestra un modelo conceptual en lenguaje UML, reflejando la jerarquía de la división catastral de partida (zona > sector > manzana > predio > propiedad horizontal > construcción). Si se analiza el diagrama, se puede observar que, si bien el grueso de la información se tiene a nivel de construcción, la representación geográfica de los datos solo se tiene a nivel de predio. Esto significa que, la asignación de vulnerabilidades y daño se podrá desarrollar a nivel de construcción, pero su representación geográfica y análisis espacial se deberá hacer a nivel de predio o superior. Por este motivo, la unidad de trabajo de este estudio será la de construcción, pero el análisis de la vulnerabilidad se hará por predio, sector y zona.

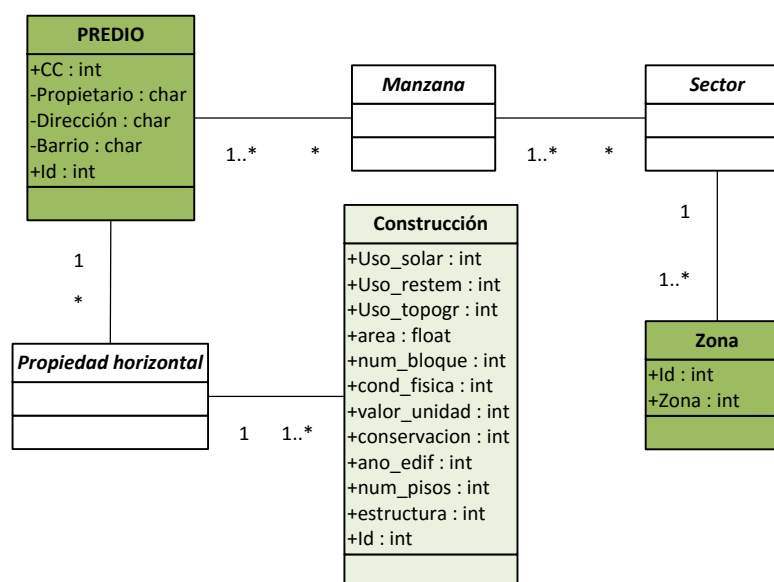


Figura 34. Modelo conceptual de los datos de partida. En verde oscuro las capas vectoriales y en verde claro las tablas sin representación geográfica.

Zona

Corresponde a una división catastral asociada a la presencia de accidentes geográficos de importancia, como ríos y avenidas principales de Rumiñahui. Para este estudio, se trabaja con 8 zonas urbanas del cantón Rumiñahui. De ellas se conoce su identificador, área, perímetro y localización geográfica. En la Figura 35 se muestra su distribución geográfica dentro del cantón.

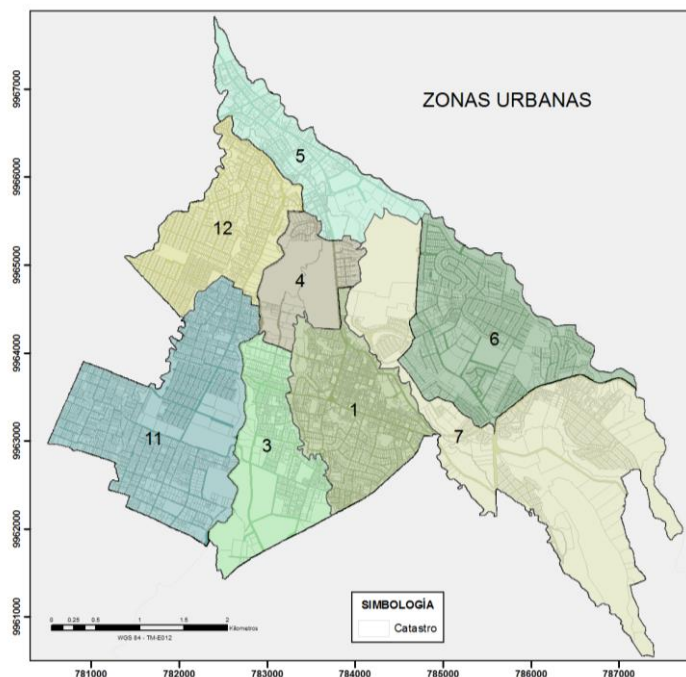


Figura 35. Distribución geográfica de las zonas urbanas de estudio.

Sector

Corresponde a una división catastral asociada a la presencia de accidentes geográficos secundarios dentro de las diferentes zonas, además de calles internas principales de cada zona. Para este estudio, se trabaja con 47 sectores distribuidos heterogéneamente en las 8 zonas. La media de sectores que hay en cada zona es de 6. Como se puede observar en la Figura 36, la zona que más sectores contiene es la zona 1, con 18 sectores, esta zona abarca todo el centro de la ciudad, la zona con menos sectores es la 3, con tan solo 2 sectores.

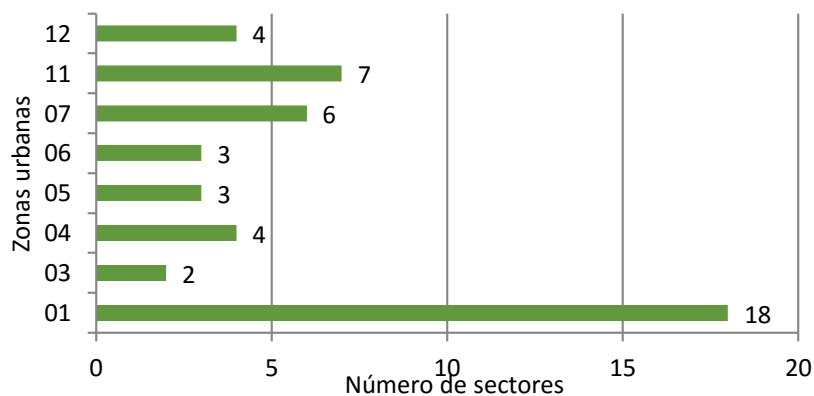


Figura 36. Distribución de sectores por zonas.

Esta distribución catastral es abstracta, ya que no se dispone de la distribución geográfica de la misma, no obstante, si se puede conocer los sectores a los que pertenece cada predio, permitiendo de este modo delimitar geográficamente cada una de estas áreas, tal y como se muestra en la Figura 37.

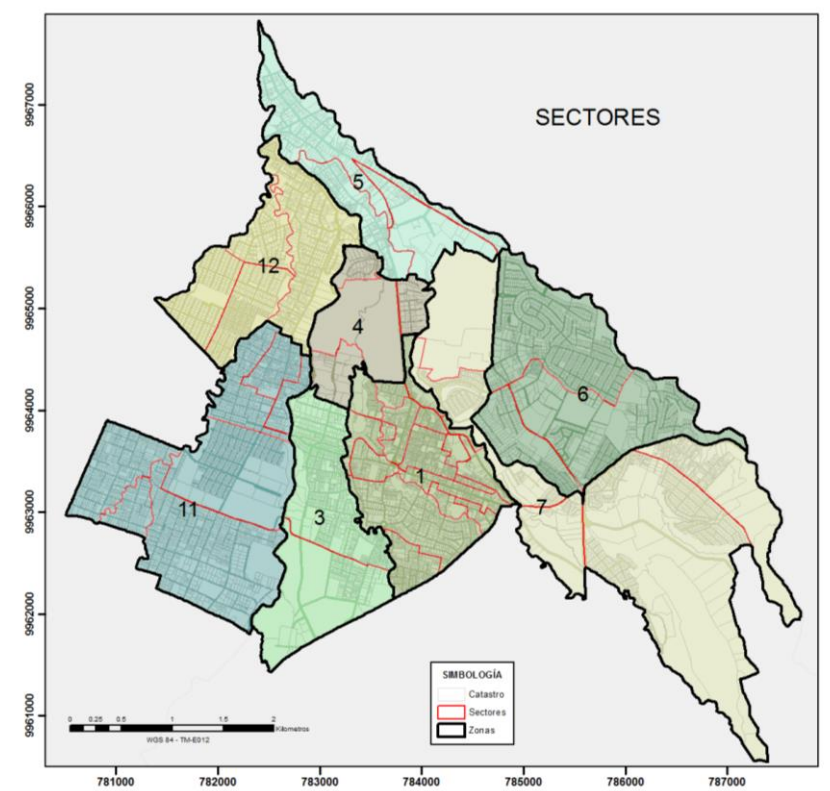


Figura 37. Distribución geográfica de los sectores en la zona de estudio.

Manzana

Corresponde a una división catastral asociada a la presencia de vías que separa cada cúmulo de predios, además son el producto de la elaboración y planificación de actividades por parte de la Dirección de Obras Públicas de Rumiñahui. Para este estudio, se trabajará con 756 manzanas distribuidas heterogéneamente en los 47 sectores y las 8 zonas. La media de manzanas que hay en cada zona es de 92. Como se puede observar en la Figura 38, la zona que más manzanas contiene es la zona 1, con 178 manzanas, y la zona con menos manzanas es la 4, con tan solo 16 manzanas.

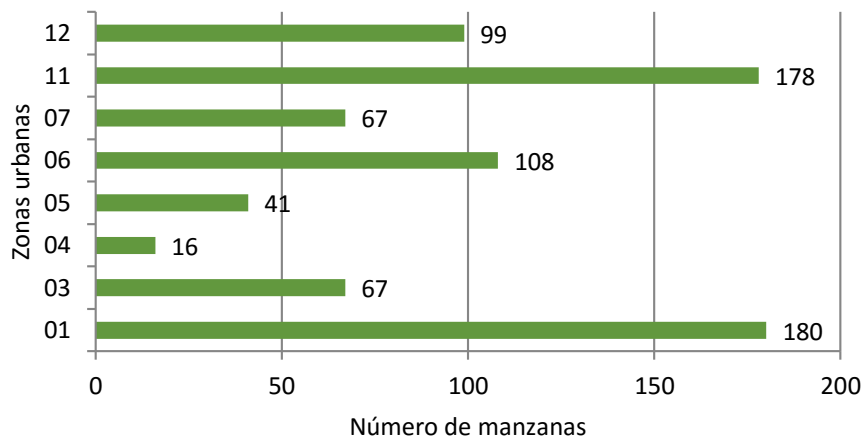


Figura 38. Distribución de manzanas por zonas.

Esta distribución catastral, al igual que la anterior, es abstracta, ya que tampoco se dispone de la distribución geográfica de la misma, no obstante también se puede conocer las manzanas a las que pertenece cada predio, lo que permite de este modo delimitar geográficamente cada una de estas áreas, tal y como se muestra en la Figura 39.

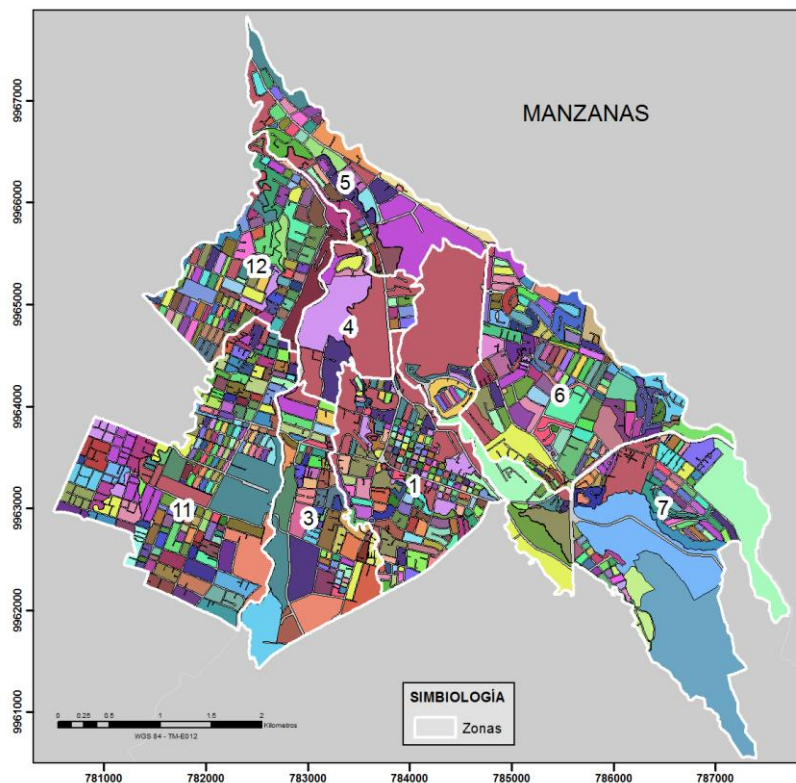


Figura 39. Distribución geográfica de las manzanas en la zona de estudio.

Predios

Corresponde con una división catastral asociada a la tenencia de escrituras por parte de cada contribuyente, donde la persona puede hacer divisiones y también está en función del plano del uso y ocupación del suelo. Para este estudio, se trabaja con 9099 predios distribuidos heterogéneamente en los 47 sectores y las 8 zonas. La media de predios que hay en cada zona es de 1031. Como se puede observar en la Figura 40, la zona que más predios contiene es la zona 1, con 2605 predios, y la zona con menos predios es la 4, con tan solo 120 predios.

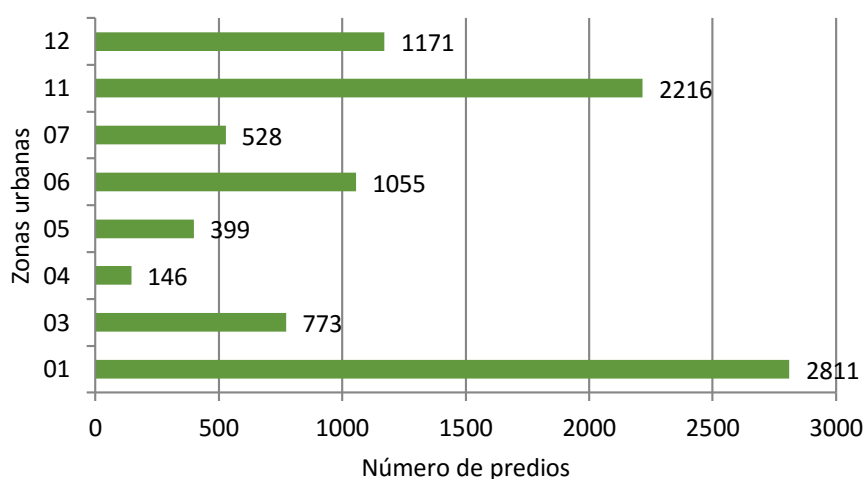


Figura 40. Distribución de predios por zonas.

Esta distribución catastral tiene representación geográfica, de hecho es la mínima unidad administrativa con representación geográfica. Por cada predio se conoce su identificador, el identificador de manzana, sector y zona a la que pertenece, su área y su perímetro. La distribución geográfica de los predios se muestra en la Figura 41.

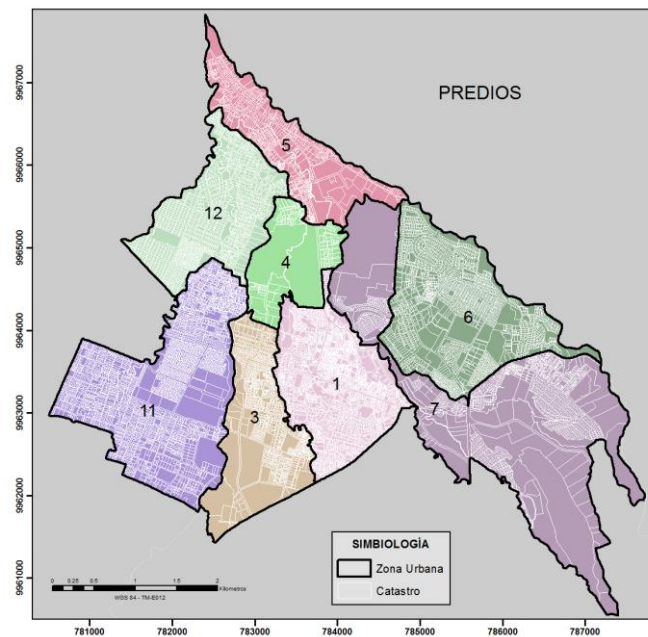


Figura 41. Distribución geográfica de los predios la zona de estudio

Propiedad horizontal

Corresponde con una división catastral asociada a una forma especial de copropiedad que se establece entre los propietarios de un inmueble dividido en pisos. Para este estudio, la base de datos inicial contiene 15108 propiedades horizontales. Que se agrupan en los 9099 predios georreferenciados, con una media de 2.7 propiedades horizontales por predio. Esta unidad no tiene representación geográfica, almacenándose dichas unidades en la información alfanumérica obtenida por el Municipio.

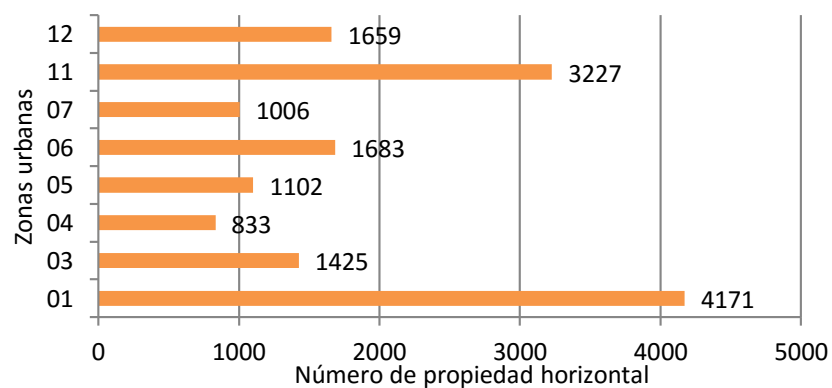


Figura 42. Distribución de propiedades horizontales por zonas.

Construcciones

Corresponde con una división catastral asociada a toda infraestructura construida dentro de cada propiedad horizontal o predio. Para este estudio, la base de datos inicial contiene 24344 construcciones, que corresponde a edificaciones de muy diverso uso, tales como viviendas principales, edificios de oficinas y/o comercio, lavanderías, parqueaderos, entre otros. Se debe tener en cuenta que no todas las propiedades horizontales están construidas, de ahí que se tengan menos construcciones que propiedades horizontales. Por tanto, no todas estas construcciones serán objeto de este estudio. Ya que para analizar el riesgo sísmico solo se incluyen las edificaciones principales de cada propiedad horizontal.

Esta unidad catastral tampoco dispone de representación geográfica, estando almacenada en la información alfanumérica ofrecida por el Municipio en una tabla. Por cada construcción se dispone de un gran número de atributos, en la Tabla 13 se muestran todos los atributos, su descripción y los valores que toma.

Tabla 13.
Información de partida para cada construcción

| NOMBRE | DESCRIPCIÓN | VALORES |
|---------------------|---|--|
| USO_SOLAR | Indica si el solar está o no construido | 0, 1: no tiene, edificado |
| USO_RESTEM | Indica si la construcción es de uso temporal | 0, 1: no tiene, si tiene |
| USO_RESPER | Indica si la construcción es de uso permanente | 0, 1: no tiene, si tiene |
| USO_TOPOGR | Indica la topografía del terreno donde se ha construido | 0, 1, 2, 3, 4, 5: a nivel, bajo nivel, sobre nivel, pendiente ascendente, pendiente descendente, accidentado |
| AREA_M2 | Indica el área, en metros cuadrados, de la construcción | ... |
| COND_FISC | Indica la condición física de la construcción | 0, 1, 2, 3: en construcción, sin modificación, ampliada, reconstruida |
| VALOR_UNIDAD | Indica el valor social de la construcción | 0, 1, 2, 3: no tiene, histórico, arquitectónico, artístico |
| CONSERVACION | Indica el estado de conservación de la construcción | 0, 1, 2, 3, 4: obsoleto, mala, regular, bueno, muy bueno |
| AÑO_EDIF | Indica el año de construcción | ... |
| NUM_PISO | Indica el número de pisos por construcción | ... |

Continúa



| | | |
|--------------------|---|----------|
| ESTRUCUTURA | Es un código constituido por ocho dígitos, cada digito representa los materiales de construcción. | Tabla 14 |
|--------------------|---|----------|

Tabla 14.

Código asociado a los 8 dígitos del atributo Estructura.

| | | | | | | | |
|-----------|-------------|----------|----------|-----------|----------|-----------|-----------|
| X | X | X | X | X | X | X | X |
| Cimientos | Mampostería | Columnas | Vigas | Entrepiso | Paredes | Cubiertas | Escaleras |

Cada uno de los dígitos señalados en la Tabla 14, pueden tomar a su vez entre cuatro y ocho valores diferentes. En la Tabla 15 se muestra la codificación completa de este campo.

Tabla 15.

Significado de pertenencia del código asignado a las estructuras

| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-------------|----------|-------------|-----------------|----------------|-----------|-----------------|----------------|-------------|--------------------|
| Cimientos | No tiene | Piedra | H. Ciclopeo | H. Armado | Pilotes | H. A. Especial | | | |
| Mampostería | No tiene | Adobe | Piedra | Ladrillo | Bloque | Tapial | | | |
| Columnas | No tiene | Madera | Hierro | H. Armado | Fábrica | H. Armado | | Caña | |
| Vigas | Madera | Hierro | H. Armado | Fábrica | H. Armado | | | | |
| Entrepiso | No tiene | Madera | Madera Ladrillo | Hierro | H. Armado | | | | |
| Paredes | Caña | Adobe Tapia | Bahereque | Madera Rústica | Bloque | Prefabricados | Ladrillo | Madera fina | |
| Cubiertas | Paja | Zinc | Teja Ordinaria | Teja especial | Asbesto C | Madera Ladrillo | Losa H. Armado | Estil panel | H. Madera Ladrillo |
| Escaleras | No tiene | Ladrillo | Madera | Hierro | H. Armado | | | | |

3.3.1.2 Clave primaria

El campo o atributo que liga las diferentes divisiones catastrales de la base de datos y, por lo tanto, el campo clave para estructurar los datos es la clave catastral local del municipio. Esta clave está compuesta de 15 dígitos distribuidos tal y como se muestra en la Tabla 16.

Tabla 16.

Composición de la Clave Catastral

| | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------------|----------|----------|--------------|----------|----------|
| X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| zona | | sector | | manzana | | | predio | | p. horizontal | | | construcción | | |

3.3.1.3 *Procesado de los datos*

Una vez identificada la estructura de los datos de partida catastrales, el primer paso que se llevó a cabo en este apartado fue eliminar todos aquellos registros mal codificados, con carencia de datos fundamentales y baldíos, ya que dichos registros no pueden ser empleados en la caracterización de la vulnerabilidad por carecer de información suficiente.

El siguiente paso fue identificar las estructuras principales dentro de cada propiedad horizontal. El objetivo de este paso fue eliminar de la base de datos las construcciones de uso secundario como bodegas, garajes y lavanderías entre otros. Estas construcciones, como se indica previamente, no supone un riesgo para la población en caso de sismo, ya que en este tipo de estudios se analiza el daño que sufrirán edificaciones principales como viviendas, oficinas y zonas de comercio. Para ello, se establece un criterio de jerarquía dentro de las construcciones de cada propiedad horizontal. Se identifica como construcciones principales las que tienen mayor número de pisos. En caso de haber varias construcciones con más de un piso, ambas se incluyen en el estudio.

Luego de desarrollar los pasos anteriores, se obtiene una base de datos final de la exposición de la zona urbana del cantón Rumiñahui (Tabla 17). Esta base de datos final consta de 8253 registros de construcciones principales (depurada de las 24965 iniciales).

Tabla 17.
Depuración de construcciones

| | Número de registros iniciales | Número de registros eliminados | Número de registros resultantes |
|--------------------|----------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| Primera depuración | 24965 | 5411 | 19554 |
| Segunda depuración | 19554 | 11301 | 8253 |

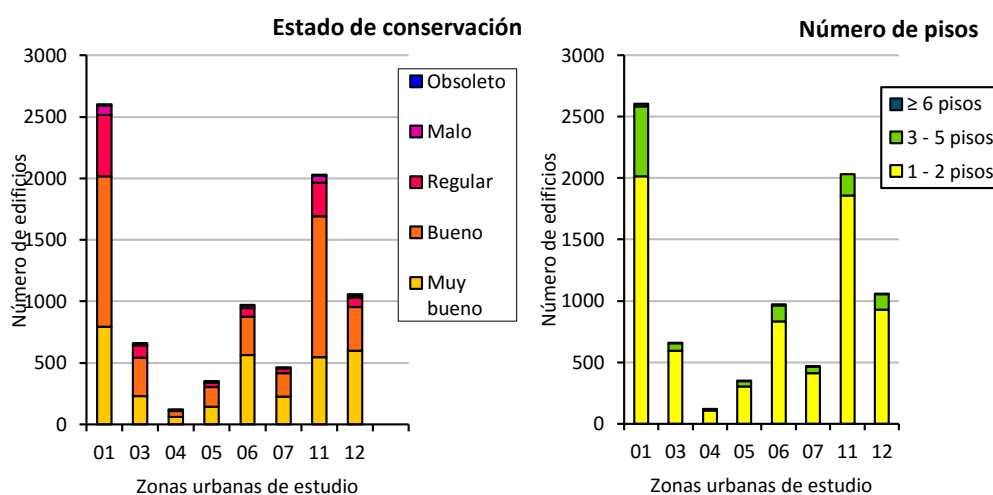
3.3.2 **Análisis de la exposición**

La base de datos final, por lo tanto, está compuesta de 8253 edificaciones principales distribuidas en 741 manzanas, 47 sectores y 8 zonas urbanas.

Toda esta información se tabuló para generar gráficos y mapas que expliquen de una forma clara y directa el estado actual de los sectores y zonas urbanas del cantón. En la Figura 44 se muestran algunos atributos de importancia como el estado de conservación, el número de pisos, la condición actual, el uso topográfico, tipo de mampostería y columnas de cada edificación de interés por zonas.

En la Figura 44 se puede observar que la mayoría de las edificaciones de interés tienen un estado de conservación bueno (46%) y muy bueno (39%), tan solo el 13% tienen un estado regular y el 2% malo u obsoleto.

La mayoría de estas edificaciones tienen entre 1-2 pisos (85%), después están las edificaciones entre 3-5 pisos (14%) y tan solo el 1% son superiores a 6 pisos. Del mismo modo, se observa que algunas de estas edificaciones fueron ampliadas o reconstruidas (17% y 31%, respectivamente), siendo el 52% edificaciones sin modificaciones. Atendiendo como fueron construidas estas edificaciones dependiendo del relieve o topografía del terreno, puede observarse que el 81% están construidas a nivel.



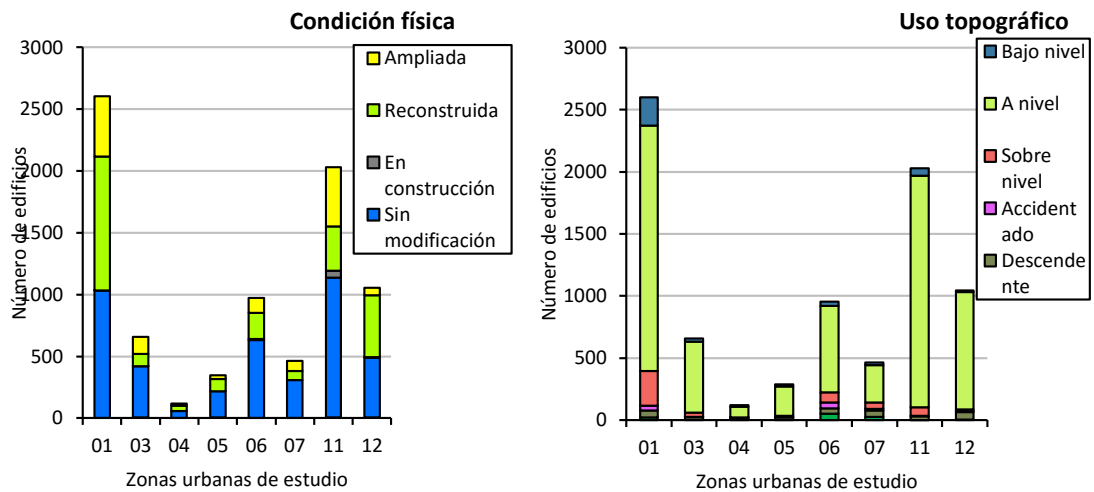


Figura 43. Estado de conservación, número de pisos, condición física y uso topográfico de las edificaciones principales por zona

Con respecto a los materiales empleados para construirlas, se puede observar en la Figura 44 que la mayoría de las construcciones no tienen mampostería, de ellas, el 87% tienen estructuras aporricadas de hormigón armado.

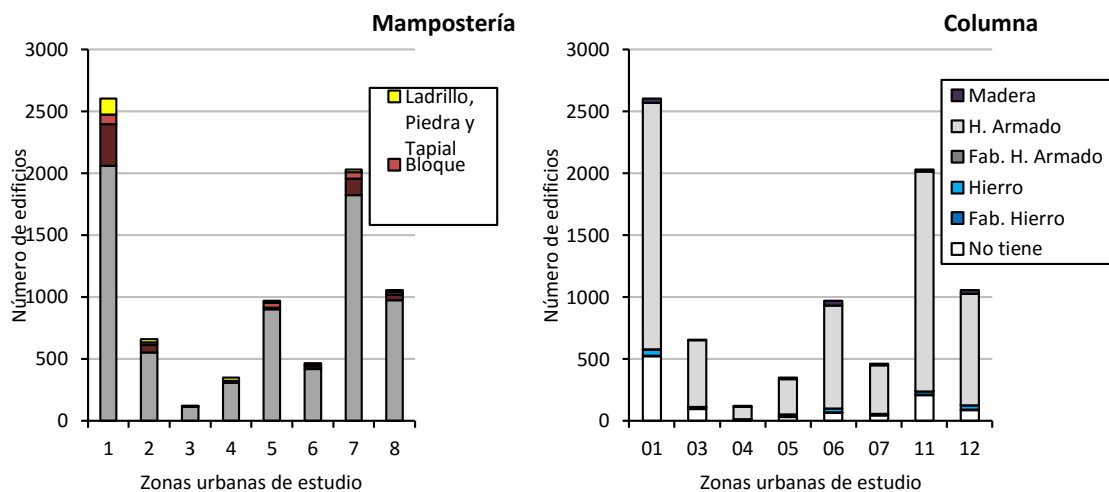


Figura 44. Tipo de mampostería y columnas de las edificaciones principales por zona

Para visualizar estos atributos de las edificaciones con más detalle, en la Figura 45, Figura 46 y Figura 47 se muestra la distribución geográfica de dichos atributos por sectores de la ciudad.

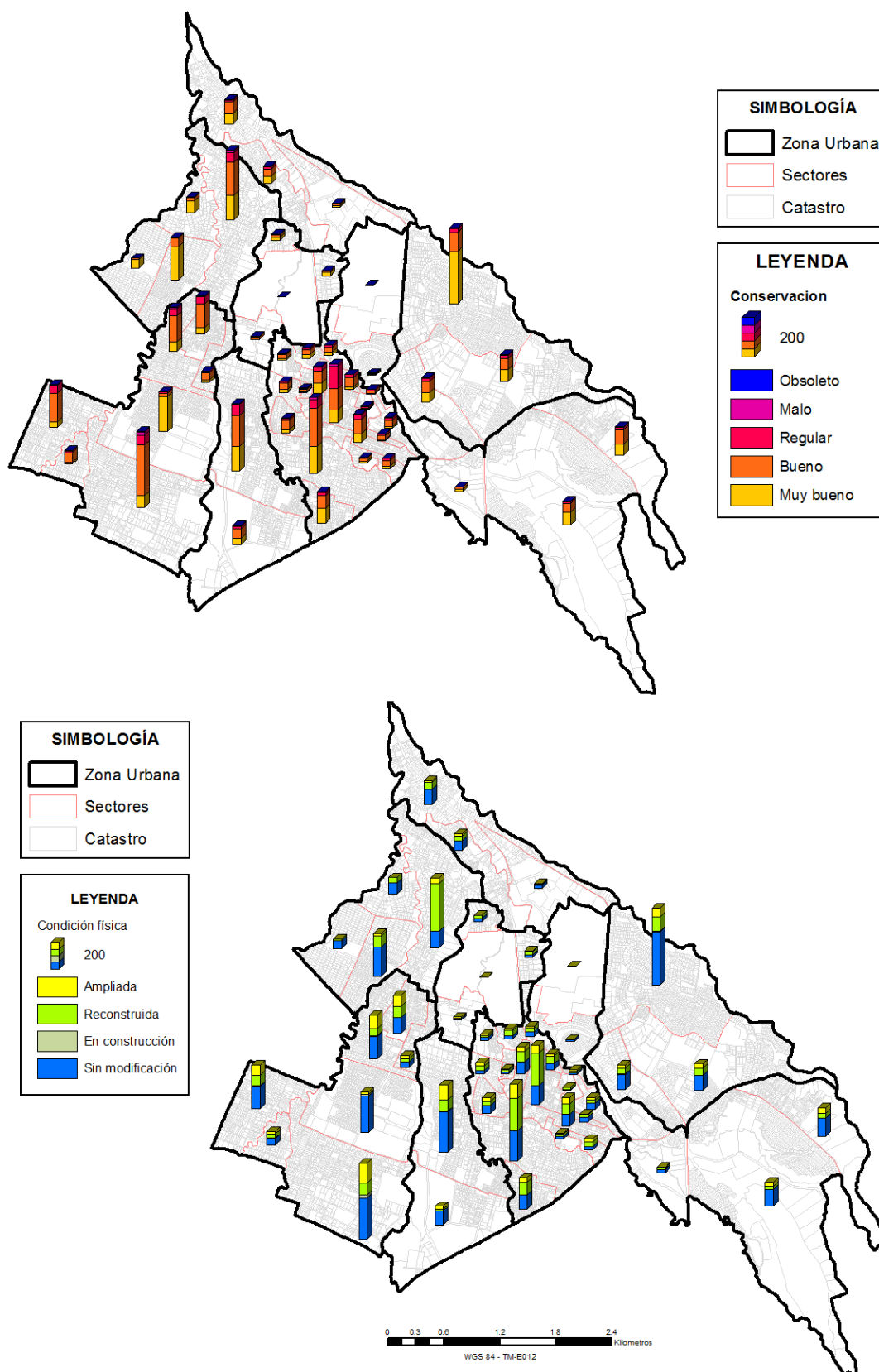


Figura 45. Estado de conservación y condición actual de las edificaciones de estudio por sectores.

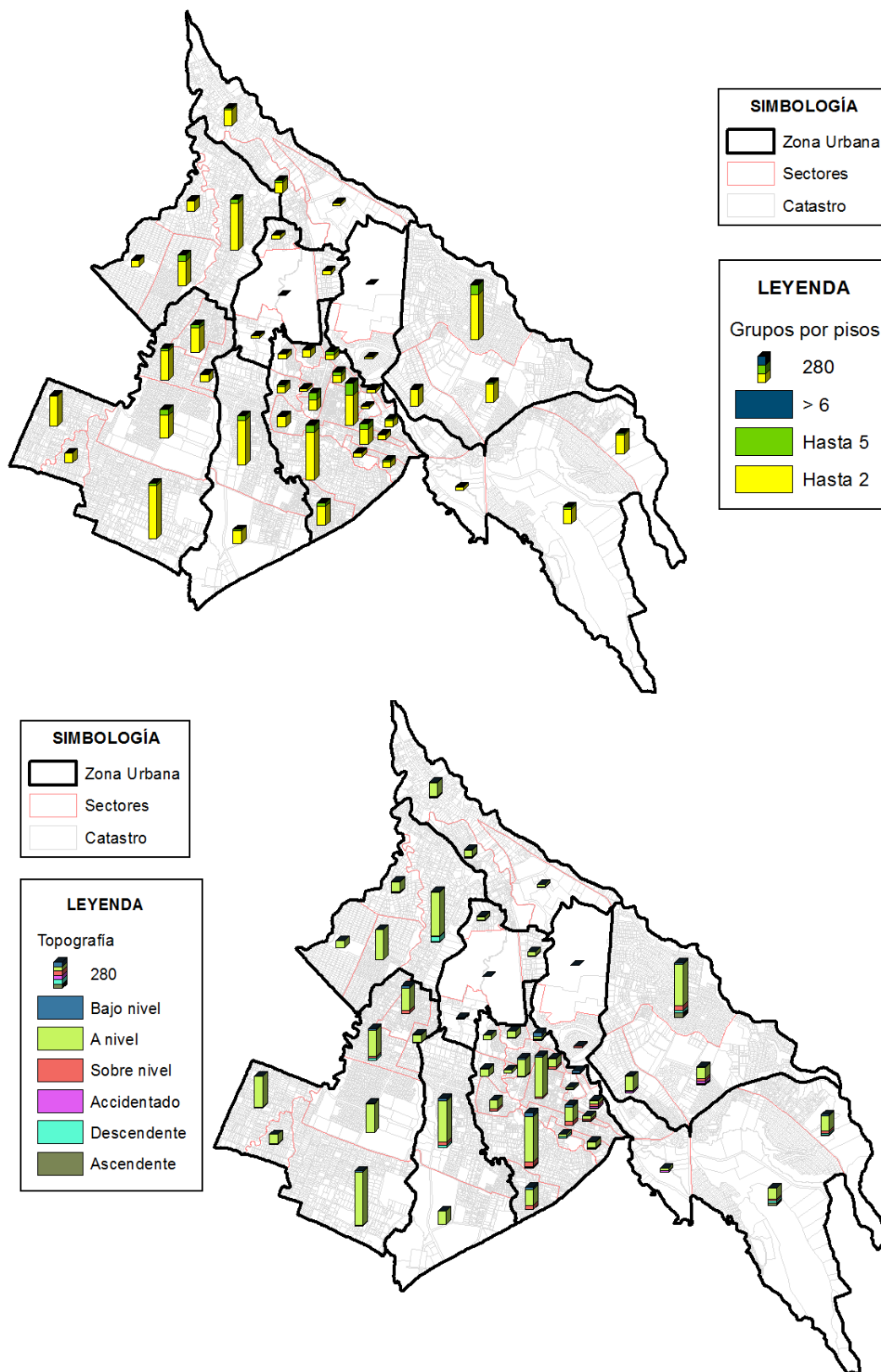


Figura 46. Número de pisos y uso topográfico de las edificaciones de estudio por sectores.

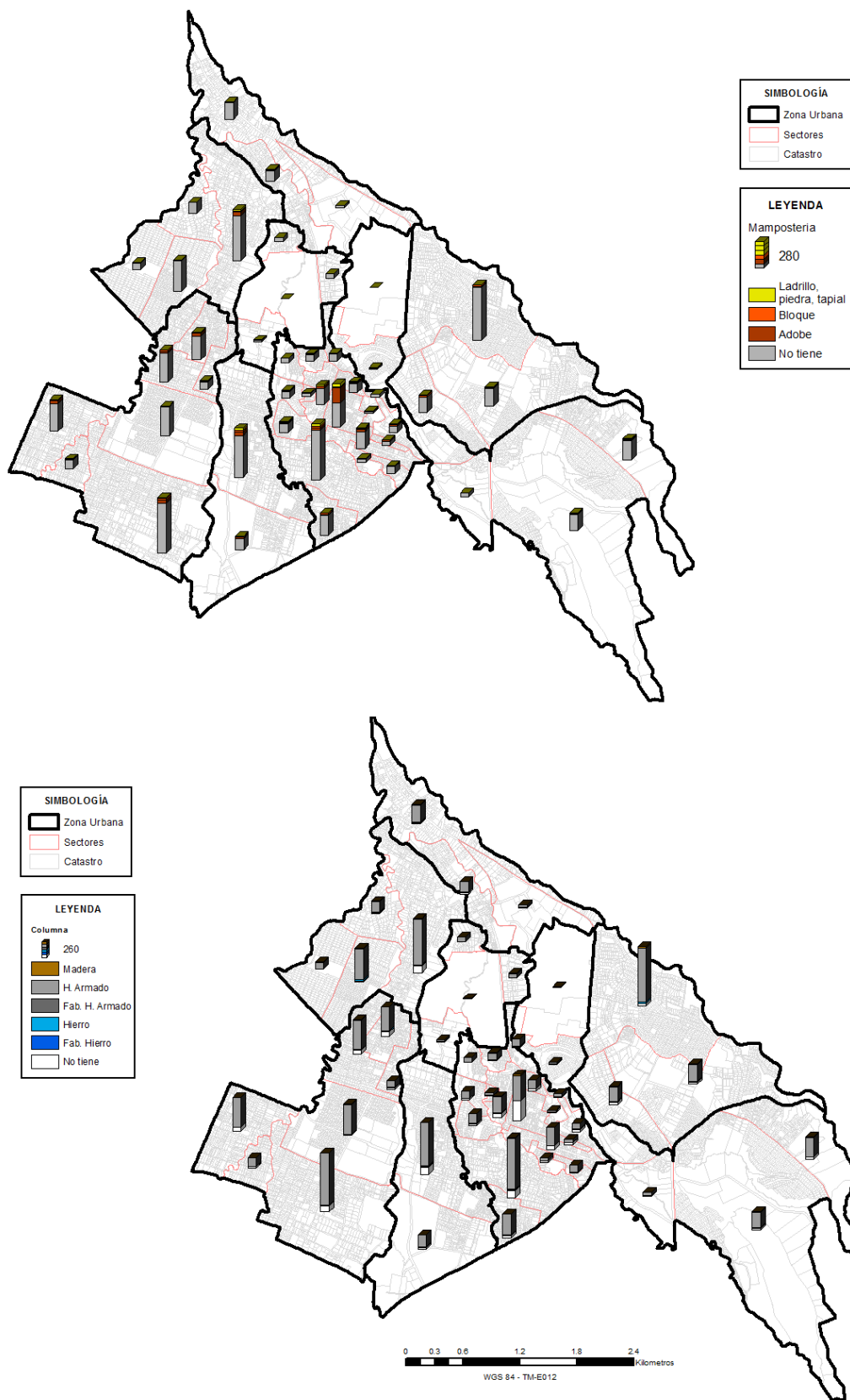


Figura 47. Tipo de mampostería y material de las columnas de las edificaciones de estudio por sectores

Otro atributo de especial importancia para la posterior caracterización de la vulnerabilidad es el año de construcción de estas edificaciones, ya que dicho atributo ayuda a identificar el nivel de código sísmico de las mismas. En la Figura 48 se muestra el número de edificios construidos por décadas en cada zona de estudio. Donde se puede observar que en cada zona hubo un notable crecimiento de la construcción en la década del 2000, ya que el 56% de las edificaciones fueron construidas en este lapso de tiempo, especialmente en la zona 1.

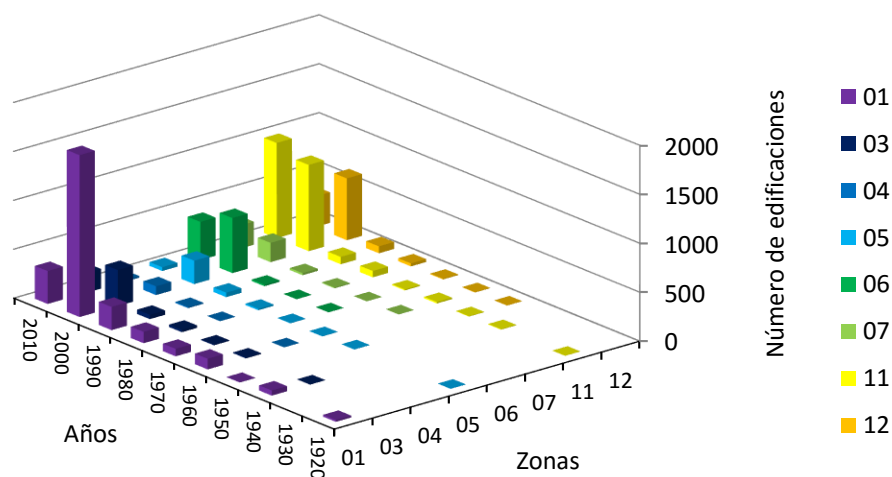


Figura 48. Edificaciones por década por cada zona.

3.4 VULNERABILIDAD SÍSMICA DE LAS ESTRUCTURAS DE RUMIÑAHUI SEGÚN MIV

3.4.1 Aplicación de la metodología

La aplicación de la Metodología del índice de vulnerabilidad merece una especial mención, ya que esta parte de la Tesis fue realizada dentro de un Marco de Convenio con la Universidad Politécnica de Madrid, mediante una instancia de investigación con el Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica, a cargo del Dr. Jorge Gaspar y la Dra. Sandra Martínez, especialista en vulnerabilidad sísmica.

Gracias a la base de datos de exposición que se trató previamente, la Dra. Martínez estableció los indicadores clave para poder asignar un índice de vulnerabilidad en cada estructura tipo. El primer paso fue establecer que

Por último, para determinar el Modificador por Comportamiento se revisaron los atributos de la base de datos de la exposición y se determinaron aquellos que se podían utilizar para dicho propósito. En las Tabla 20 y Tabla 21 se muestran dichos modificadores.

Tabla 20.

Modificadores de comportamiento del índice de vulnerabilidad VI, para edificios de mampostería no reforzada. Rumiñahui – Ecuador.

| FACTORES DE COMPORTAMIENTO | PARÁMETROS | PUNTUACIÓN DEL MODIFICADOR M_{cj} |
|-------------------------------------|--------------------|-------------------------------------|
| Estado de conservación | Buen mantenimiento | -0.04 |
| | Mal mantenimiento | +0.04 |
| Altura o número de plantas | Bajo (1 o 2) | -0.02 |
| | Medio (3, 4 o 5) | +0.02 |
| | Alto (6 o más) | +0.06 |
| Intervenciones de reparación | ... | +0.04 |
| Morfología del terreno | Pendiente | +0.02 |

Tabla 21.

Modificadores de comportamiento del índice de vulnerabilidad VI, para edificios de hormigón armado. Rumiñahui – Ecuador.

| FACTORES DE COMPORTAMIENTO | PUNTUACIÓN M_{cj} SEGÚN NIVEL DE DISEÑO SISMORRESISTENTE | | | |
|---------------------------------|--|-------------------------------------|----------------------------------|-------|
| | CÓDIGO DE NIVEL BAJO (PRE OR LOW CODE) | CÓDIGO DE NIVEL MEDIO (MEDIUM CODE) | CÓDIGO DE NIVEL ALTO (HIGH CODE) | |
| Nivel de Código | +0.16 | 0.00 | -0.16 | |
| Mantenimiento deficiente | +0.04 | +0.02 | 0.00 | |
| Altura o número plantas | Bajo (1 o 2) | -0.04 | -0.04 | |
| | Medio (3, 4 o 5) | 0.00 | 0.00 | |
| | Alto (6 o más) | +0.08 | +0.06 | +0.04 |
| Cimientos | Vigas (beams) | -0.04 | 0.00 | 0.00 |
| Morfología del terreno | Pendiente | +0.02 | +0.02 | +0.02 |

Una vez establecidos los criterios con los que se debía aplicar la metodología de MIV en el área de estudio por parte de la especialista en vulnerabilidad sísmica, se pudo implementar esta metodología con el SIG. Por medio de filtros combinados, se pudo asignar el índice de vulnerabilidad característico de cada edificación de interés. En la Figura 49 se presenta un diagrama de flujo donde se explica de una forma didáctica el proceso que se realizó para obtener la capa final de Índice de Vulnerabilidad.

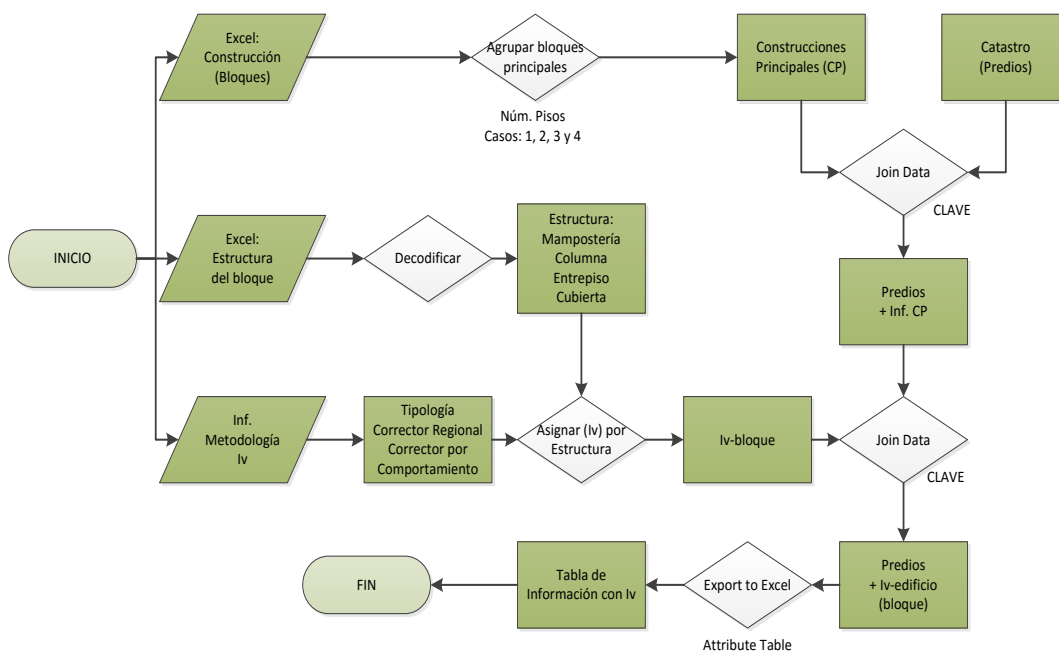


Figura 49. Diagrama de Flujo: Índice de Vulnerabilidad

3.4.2 Análisis de la vulnerabilidad

La primera aproximación del tipo de vulnerabilidad de las estructuras de interés se obtuvo aplicando los criterios de la Tabla 19. En la Figura 50 y Tabla 22 se pueden observar las tipologías constructivas presentes en cada zona urbana de estudio.

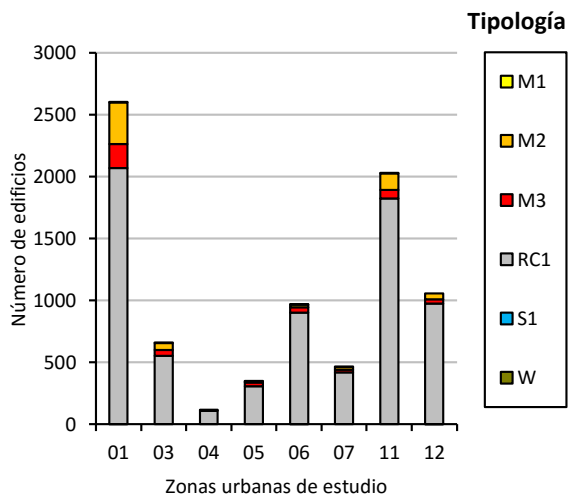


Figura 50. Tabulación de las tipologías constructivas por zonas.

Tabla 22.
Porcentaje de edificios por tipologías.

| ZONAS | TIPOLOGÍA | | | | | | | | TOTAL GENERAL |
|---------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|---------------|
| | M1.2 | M2 | M3.1 | M3.2 | M3.4 | RC1 | S1 | W | |
| 01 | 2 | 339 | 63 | 129 | 3 | 2066 | | 2 | 2604 |
| 03 | 1 | 58 | 22 | 21 | 2 | 554 | | | 658 |
| 04 | | 4 | 2 | 3 | | 111 | | | 120 |
| 05 | 2 | 9 | 4 | 25 | | 308 | | | 348 |
| 06 | 2 | 25 | 32 | 8 | | 902 | 2 | | 971 |
| 07 | 2 | 22 | 8 | 12 | 1 | 419 | | | 464 |
| 11 | 2 | 136 | 47 | 18 | 2 | 1826 | | | 2031 |
| 12 | | 46 | 17 | 19 | | 973 | 1 | 1 | 1057 |
| Total general | 11 | 639 | 195 | 235 | 8 | 7159 | 3 | 3 | 8253 |
| Porcentaje | 0% | 8% | 2% | 3% | 0% | 87% | 0% | 0% | 100% |

Como se puede observar, el 87% de los edificios de las zonas urbanas del cantón son de tipología RC1 (Estructuras de hormigón) y el resto de tipologías, el 13%, se distribuye en su mayoría en tipologías M2, M3.2 y M3.1 (Estructuras de mampostería). Las tipologías M1.2, M3.4 S1 y W, apenas alcanzan el 1%, es decir, su presencia en el cantón prácticamente es inexistente.

En la Figura 51 se muestra la distribución geográfica de tipologías constructivas por sectores de la ciudad. Donde se puede observar que en todos los sectores existe un claro predominio de tipología RC1. Pero cabe mencionar que en el sector de la zona 1 existe una clara presencia de mampostería tipo M2, asociada a materiales como adobe, resultado que confirma la realidad ya que en dichos sectores se ubica el casco antiguo de Rumiñahui.

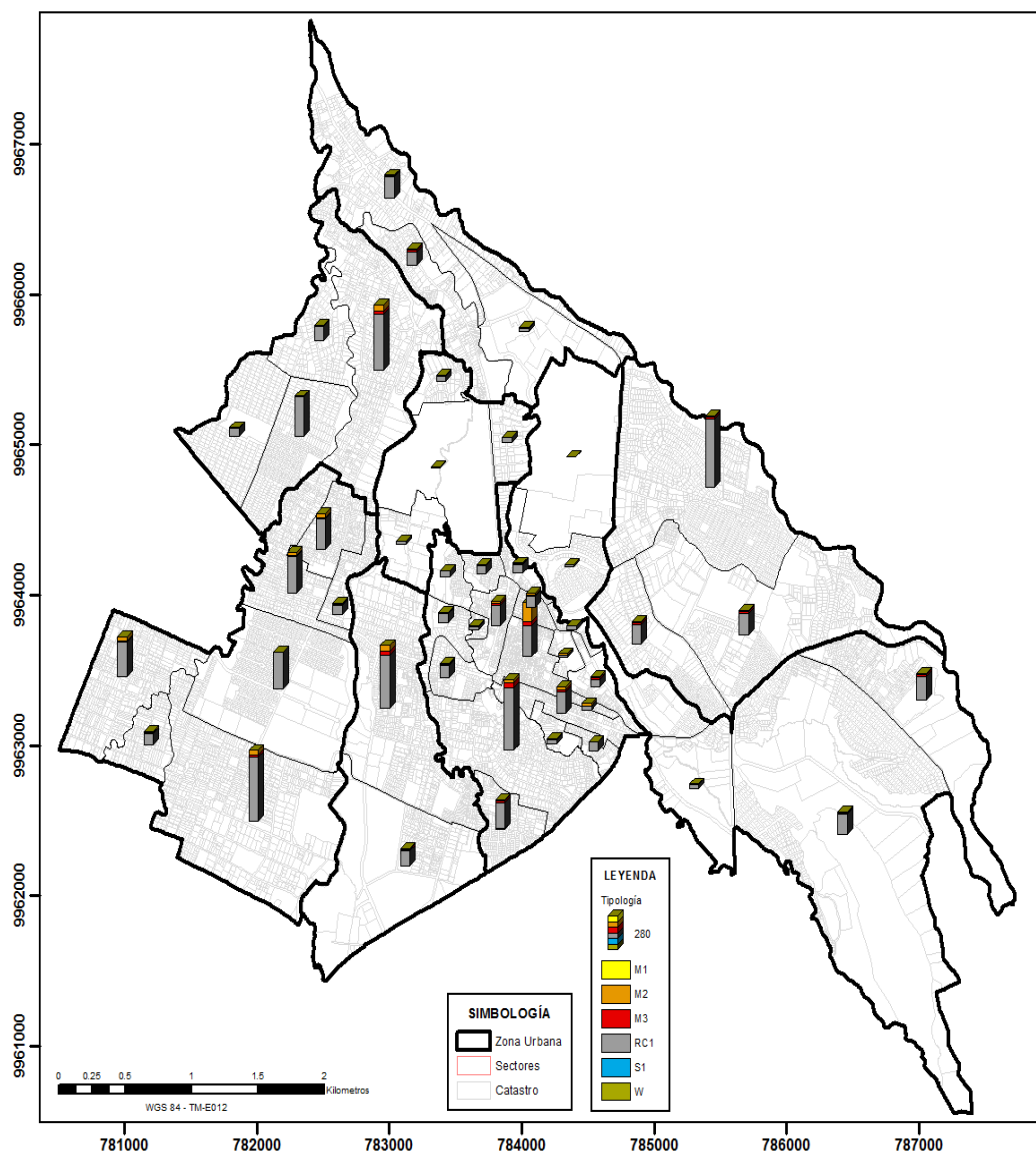


Figura 51. Distribución geográfica de las tipologías constructivas por sectores de la ciudad.

La

Figura 52, muestra el resultado de la implementación del Índice de vulnerabilidad completo, donde claramente se puede observar que la zona con mayor vulnerabilidad sísmica es la conglomeración de edificaciones (en color azul) de la zona 1 y coincide con el centro de la ciudad (casco antiguo de Sangolquí). Parte de las zonas 5 y 12 presentan un índice menor que el de la zona 1 (en color verde oscuro), siendo aún un índice elevado. En la zona 11, en su parte externa, se identifica una gran presencia de edificaciones que poseen un índice de vulnerabilidad bajo, esto se debe a que en esta parte de la zona 11 las edificaciones coinciden con conjuntos habitacionales de reciente construcción, a partir del año 2000 esta zona creció por la presencia de proyectos inmobiliarios que contemplan condominios y urbanizaciones.

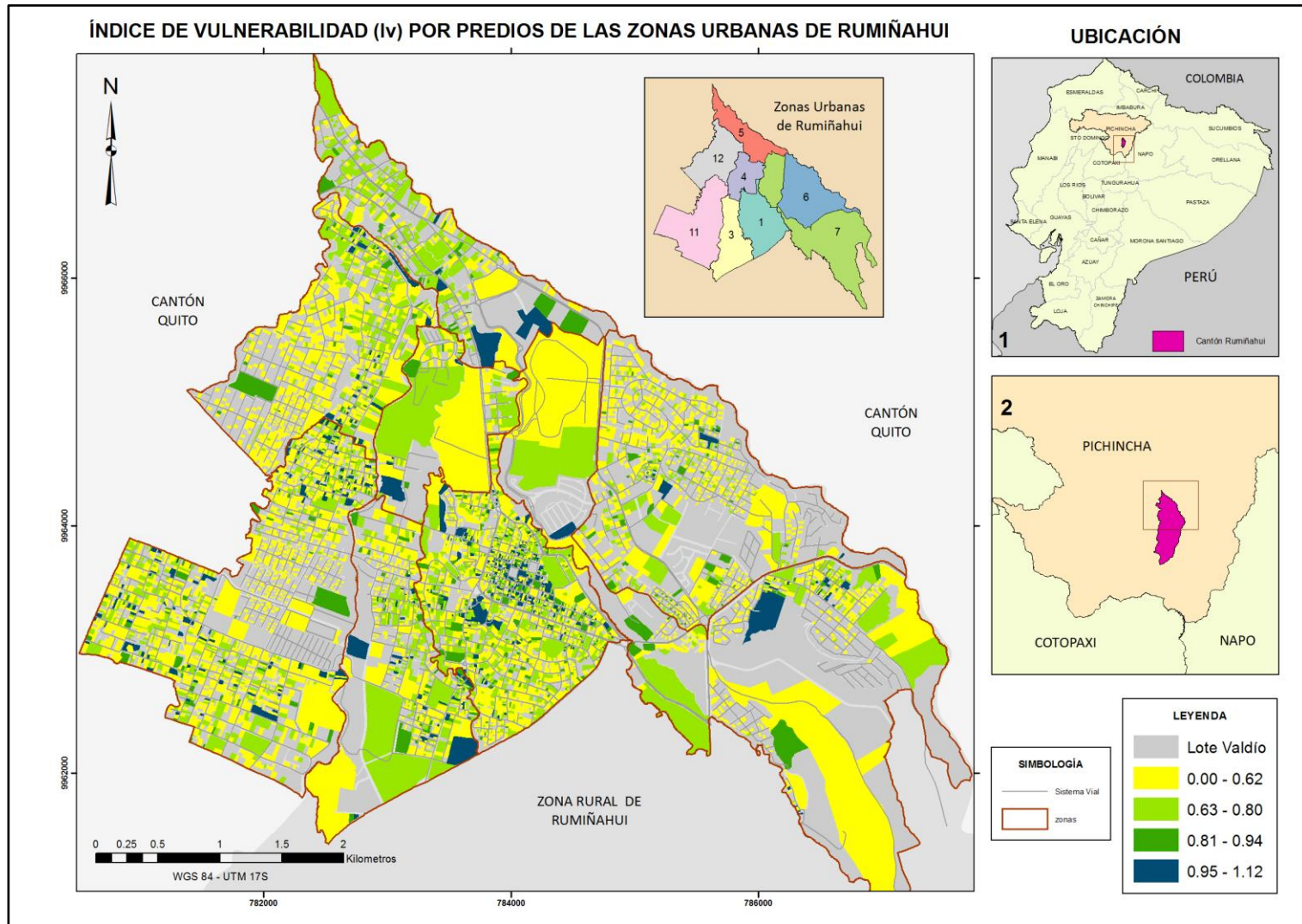


Figura 52. Mapa de Índice de Vulnerabilidad por predios en las zonas urbanas de Rumiñahui.

3.5 RIESGO SÍSMICO DEL CANTÓN RUMIÑAHUI SEGÚN MIV PARA LOS DOS ESCENARIOS.

3.5.1 Estimación de los escenarios de riesgo

Una vez estimada la peligrosidad, en términos de intensidad macrosísmica teórica (I), y el índice de vulnerabilidad en cada edificación (Iv), el siguiente paso es estimar el daño que se espera en las estructuras.

Para ello, el primer paso es identificar la intensidad esperada en cada edificación. A partir de la capa de intensidad que se obtiene para cada escenario, es posible obtener dicha intensidad en cada edificación extrayendo el valor de dichas capas (asociadas a cada escenario) en los centroides de cada predio (Figura 53).

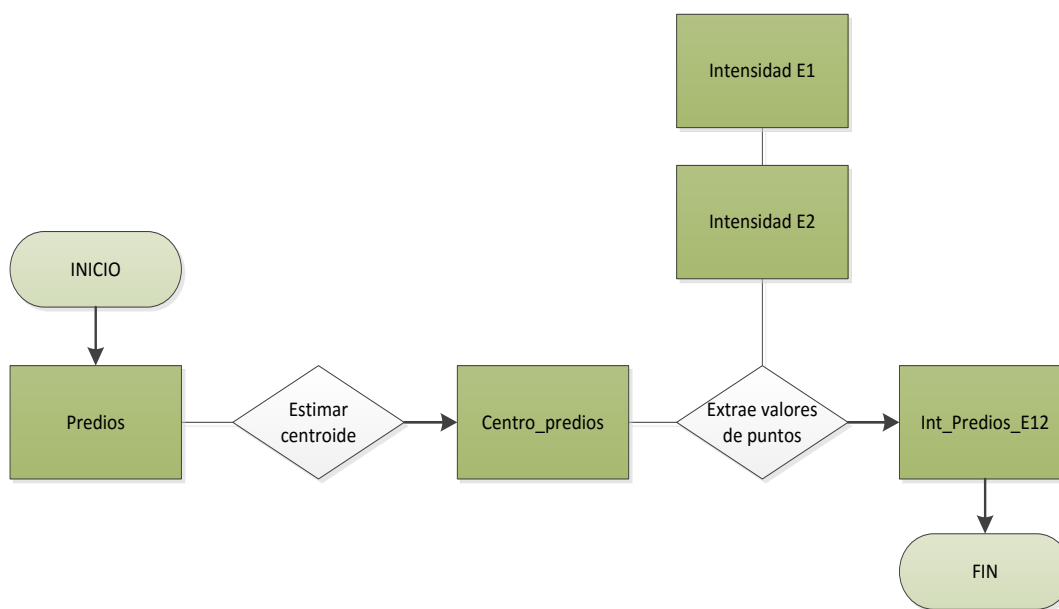


Figura 53. Flujo de trabajo para obtener la intensidad macrosísmica teórica en cada predio.

A partir de este atributo, se puede asignar dicho valor a todas las edificaciones de ese predio y, por lo tanto, tener las variables necesarias para obtener el daño promedio (ecuación 4) y las probabilidades de los diferentes tipos de daño (D0, D1, D2, D3, D4, D5). Se tiene en cuenta que la vulnerabilidad de las edificaciones es invariable para cada escenario.

En la Figura 54 se muestra el diagrama de flujo para obtener los dos escenarios de daño estudiados.

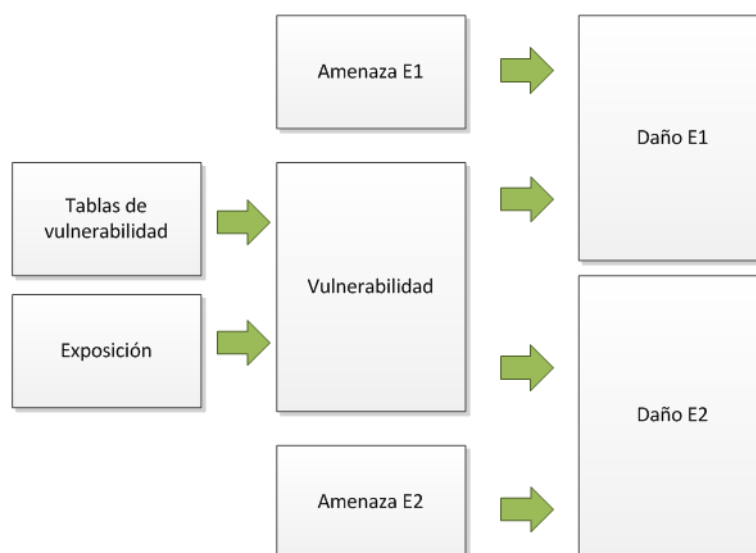


Figura 54. Procesos para obtener las probabilidades de daño.

3.5.2 Resultados

La tabulación de los resultados de ambos escenarios de riesgo permite compararlos y determinar cuál de ellos es el de mayor afectación para el emplazamiento. En este caso, se trata de un escenario de magnitud alta (8.8) a gran distancia (aproximado 200km) (Escenario 1 de amenaza), al que se le estima una intensidad macrosísmica media en el cantón de VII, y un escenario sísmico de magnitud moderada (6.0) a poca distancia (aproximado 12 km), al que se le asigna una intensidad macrosísmica de VII-VIII. Como se puede observar, pese a la diferencia de escenarios, las intensidades esperadas en ambos no distan mucho, lo que genera escenarios no muy diferentes de daño.

En la Figura 55 se muestra el número de edificios con diferentes tipos de daño para los dos escenarios. Donde se observa que el escenario 2 plantea un mayor daño en las edificaciones. Este es un escenario generado por un sismo de menor magnitud que el primero, la proximidad del mismo hace que sea altamente dañino para el cantón.

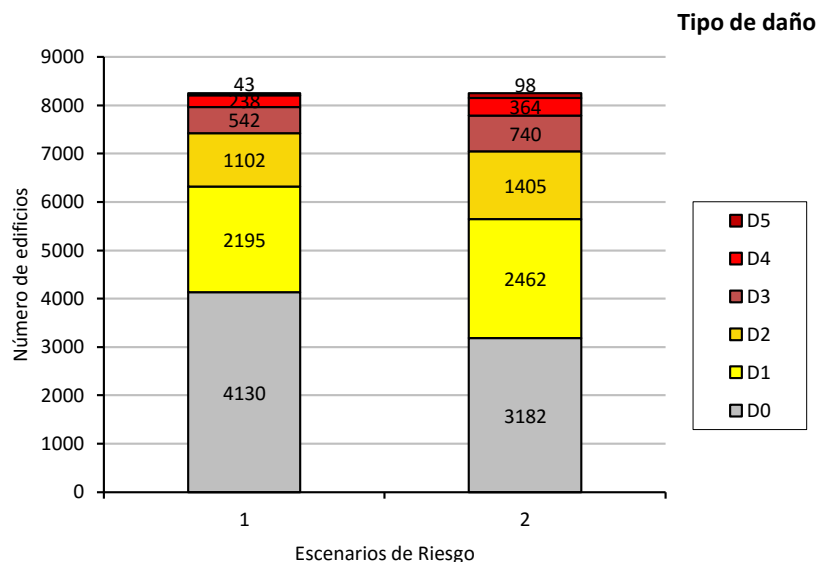


Figura 55. Comparación de Escenarios Sísmicos en función del número de edificios con diferente tipo de daño esperado.

En la Figura 56 se muestran los porcentajes de edificios con diferentes tipos de daño, donde se puede observar que el escenario con mayor riesgo es el Escenario 2 de amenaza, debido a que el 61% de las edificaciones va a sufrir cualquier tipo de daño y solo el 39% tendrá D0 (daño nulo). Esto se contrapone con el Escenario 1, donde el 50% de las edificaciones sufrirá daño nulo.

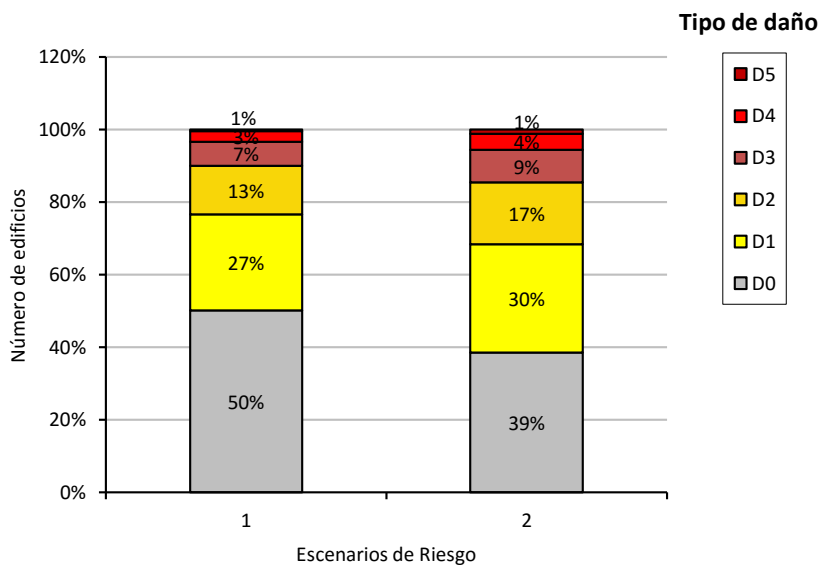


Figura 56. Porcentaje de edificios con los diferentes grados de daño.

Si se analiza el número de edificios con diferentes tipos de daños por zona, Figura 57, se puede observar que la distribución del daño en las edificaciones es proporcional en cada zona.

En la zona 1 se observan resultados muy similares para los dos escenarios, siendo los daños un poco mayores en el Escenario 2. En la zona 3 existe un cambio ligero en el tipo de daño D0 y D1, el escenario 2 posee menor tipo de daño D0 y D1 pero mayor tipo de daño D3. Las zonas 4 y 5 se comparten de la misma manera que la zona 1. Y las zonas 6, 7, 11 y 12 tienen un comportamiento similar que la zona 2, donde se nota mayor tipo de daño D1, D2 y D3.

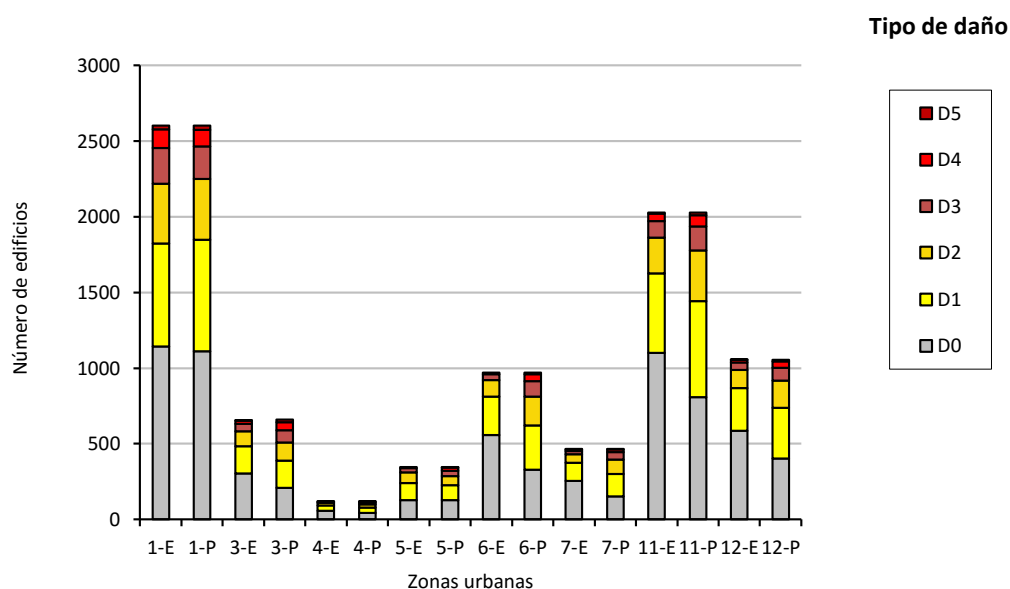


Figura 57. Comparación de escenarios mediante zonas.

En la Figura 58 y Figura 59 se muestra la distribución espacial de los diferentes tipos de daño que sufrirían las edificaciones. Donde se aprecia que el escenario 2 es el de más riesgo, ya que posee menos daño nulo (D0) y por ende más daño leve, moderado, severo y extensivo (D1, D2, D3 Y D4). Para colapso ambos escenarios comparten el mismo 1% de afectación.

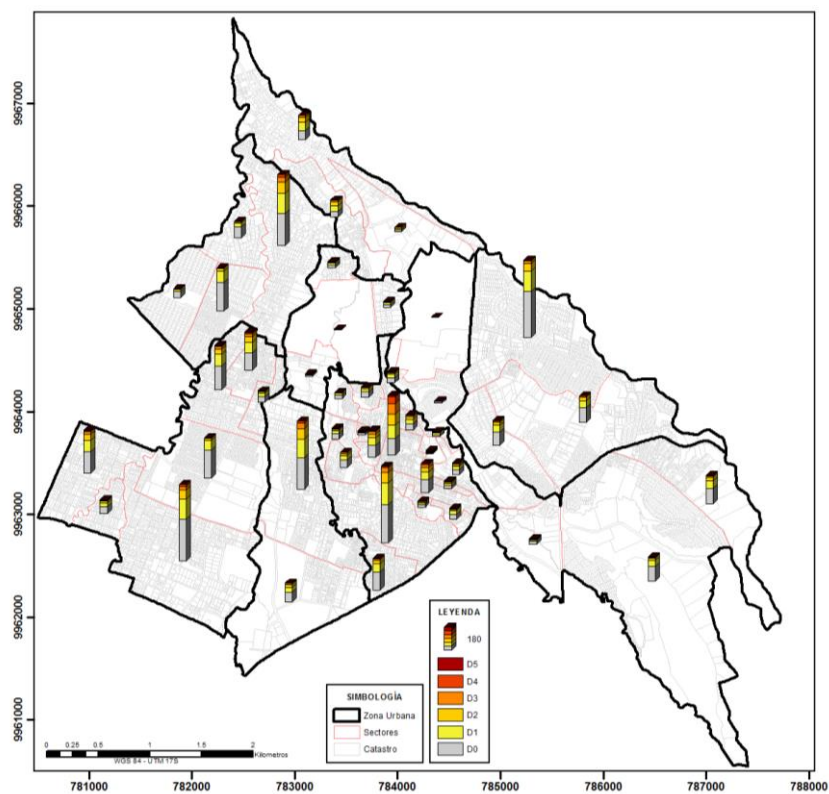


Figura 58. Mapa de riesgo sísmico. Escenario 1. Tipos de daño.

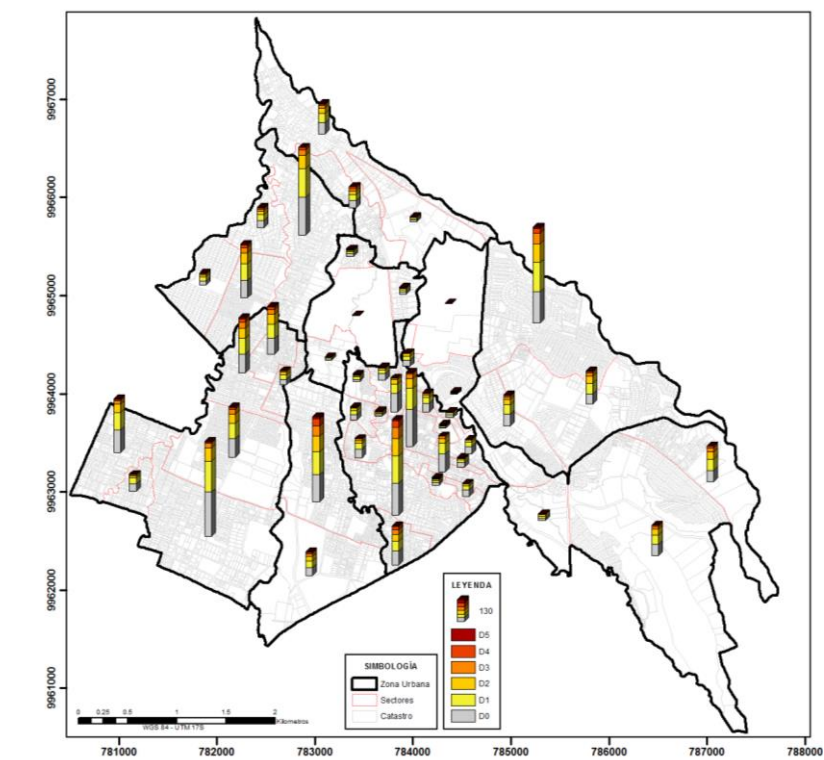


Figura 59. Mapa de riesgo sísmico. Escenario 2. Tipos de daño.

CAPÍTULO IV

4 CONCLUSIONES

Ecuador es un país de alta peligrosidad sísmica, debido a su ubicación (dentro del cinturón de Fuego del Pacífico) y la amplia zona de subducción que domina la actividad sísmica regional. Esta zona de subducción genera sismos de gran magnitud (Interfase) y de menor magnitud en fallas próximas al cantón Rumiñahui, como el sistema de fallas ciegas de Quito, a 13 kilómetros del cantón.

El registro histórico del país y los estudios de tectónica local desarrollados por Alvarado et al. 2014 entre otros, ayudan a identificar el peligro real del cantón Rumiñahui, permitiendo establecer escenarios deterministas probables que pueden afectar a la zona de estudio.

A partir de lo anterior, se establecen dos escenarios de amenaza, uno asociado a un sismo de gran magnitud lejos del cantón (reproduciendo el sismo de Esmeraldas de 1906 de magnitud 8.8 en la zona de Interfase) y otro asociado a un sismo próximo de magnitud moderada (suponiendo un sismo de magnitud 6.0 en el segmento de Puengasí del sistema de fallas ciegas de Quito). Aun siendo escenarios de magnitudes muy diversas, las aceleraciones máximas esperadas (con el modelo de Zhao et al. 2006) y las intensidades macrosísmicas (con la relación de Saragoni 1982) no difieren mucho en ambos casos, ya que las diferencias de magnitudes se compensan con las diferencias de distancias entre la fuente y el emplazamiento. Generando ambos casos intensidades de VII (Escenario 1) y VIII-VII (Escenario 2). Siendo por lo tanto un escenario de mayor riesgo en Escenario 2 de Amenaza (el sismo próximo de magnitud moderada).

Para estudiar la vulnerabilidad del cantón Rumiñahui se seleccionó 8 zonas urbanas del mismo, identificando un total de 8253 edificaciones principales a las que se les asigna un valor de vulnerabilidad con la Metodología de Índice de Vulnerabilidad de Benedetti and Petrini 1982. Esta labor se desarrolló en una estancia de investigación en el Grupo de Ingeniería Sísmica de la Universidad

Politécnica de Madrid, con la ayuda de la Especialista en vulnerabilidad la Dra. Martínez.

El análisis de la vulnerabilidad refleja que la mayoría de las edificaciones (87 %) pertenecen a la tipología constructiva RC1 (Hormigón armado), con un índice de vulnerabilidad medio por tipología de 0.442 (siendo 0 poco vulnerable, 1 muy vulnerable).

Los resultados de daño para los dos escenarios nos muestran dos supuestos muy similares, donde el Escenario 2 alcanzaría un mayor porcentaje de edificios con un grado de daño mayor. En ambos casos, un 1% de las edificaciones podrían colapsar y el 10 % tendrían daño severo y extensivo.

REFERENCIAS

Abrahamson, N. A., Silva, W. J., & Kamai, R. (2014). Summary of the ASK14 ground motion relation for active crustal regions. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1025-1055.

Alvarado, A., Audin, L., Nocquet, J. M., Lagreulet, S., Segovia, M., Font, Y., ... & Jarrin, P. (2014). Active tectonics in Quito, Ecuador, assessed by geomorphological studies, GPS data, and crustal seismicity. *Tectonics*, 33(2), 67-83.

Angeletti, P., Bellina, A., Guagenti, E., Moretti, A., & Petrini, V. (1988). Comparison between vulnerability assessment and damage index, some results. In *Proceeding of the Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, 7, 181-186.

ATC, 1985. *Earthquake Damage Evaluation Data for California*, Applied Technology Council Report ATC-13, Redwood City, California.

ATC-25 (1991). *Seismic Vulnerability and impact of disruption on lifelines in the coterminous United States*. Applied Technology Council. Redwook City, California.

Atkinson, G. M., & Macias, M. (2009). Predicted ground motions for great interface earthquakes in the Cascadia subduction zone. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(3), 1552-1578.

Barbat, A. H. (1998). "El riesgo sísmico en el diseño de edificios". Cuadernos técnicos 3. Calidad Siderúrgica, Madrid. 248 pp.

Barona Zaldumbide, D. M. (2010). *Vulnerabilidad sísmica del Centro Histórico de Sangolquí*.

Benedetti, D. and Petrini, V. (1984). Sulla vulnerabilità sismica di edifici in muratura: Proposte di un metodo di valutazione. *L'industria delle Costruzioni* 149, 66-78.

Benito, B, Jiménez, M (1999). Peligrosidad Sísmica. Física de la Tierra, 11, 13-47

Bermúdez, N. (2013). Análisis de vulnerabilidad cantón Rumiñahui. Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos. Ecuador.

Boore, D. M., Stewart, J. P., Seyhan, E., and Atkinson, G. A., 2013. NGA-West2 Equations for Predicting Response Spectral Accelerations for Shallow Crustal Earthquakes, PEER Report No. 2013/05, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA, 134 pp

Botija, M. D. C. L. (2012). Riesgos naturales: clasificación, conceptos y cuestiones. Actuarios, 31, 7-11.

Building Seismic Safety Council (BSSC), 2009. NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, FEMA P-749, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.

Burrough, P. A., & McDonnell, R. A. (1998). Principles of GIS. Oxford University Press, London.

Burton, I., & Kates, R. W. (1964). The floodplain and the seashore: a comparative analysis of hazard-zone occupance. *Geographical Review*, 54(3), 366-385.

CALVO GARCIA-TORNEL, F. La Geografía de los riesgos. Geocrítica, Universidad de Barcelona, noviembre 1984, nº 54, p.5- 40

Campbell, K. W., and Bozorgnia, Y., 2013. NGA-West2 Campbell-Bozorgnia Ground Motion Model for the Horizontal Components of PGA, PGV, and 5%-Damped Elastic PseudoAcceleration Response Spectra for Periods Ranging from 0.01 to 10 s, PEER Report No. 2013/06, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA, 238 pp

CEC-77, (1977), Código Ecuatoriano de la Construcción. Sección Reglamentaria. Instituto Ecuatoriano de Normalización, 141 p. Quito.

Chiou, B. S.-J., and Youngs, R. R., 2013. Update of the Chiou and Youngs NGA Ground Motion Model for Average Horizontal Component of Peak Ground

Motion and Response Spectra, PEER Report No. 2013/07, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA, 76 pp.

Coburn A. y Spence R. (2002). Earthquake protection. 2nd edition. Ed. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK.

Codermatz, R., Nicolich, R., & Slejko, D. (2003). Seismic risk assessments and GIS technology: applications to infrastructures in the Friuli–Venezia Giulia region (NE Italy). *Earthquake engineering & structural dynamics*, 32(11), 1677-1690.

Cova, T. J., & Church, R. L. (1997). Modelling community evacuation vulnerability using GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 11(8), 763-784.

Echarri, L. 2007. Población, ecología y ambiente. Universidad de Navarra.

European Seismological Commission ESC (1998). "European Macroseismic Scale 1998" Conseil de L'Europe. Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie. Vol. 15. Editor G. Grunthal. Luxembourg 1998.

Federal Emergency Management Agency (2005). Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures, FEMA 440, Prepared by Applied Technology Council (ATC-55 Project), Washington, D.C., United States, June 2005.

Feriche Fernández-Castanys, M. (2012). Elaboración de escenarios de daños sísmicos en la Ciudad de Granada. Tesis doctoral. Universidad de Granada.

Garcia D, Singh SK, Herráiz M, Ordaz M, Pacheco JF (2005) Inslab earthquakes of central Mexico: peak ground-motion parameters and response spectra. *Bull Seismol Soc Am* 95:2272–2282

Geological and Mining Institute of Spain and General Directorate of Civil Protection, *Proyecto RISMUR: seismic risk in the Region of Murcia*. Department of the Presidency of the Region of Murcia: Murcia, Spain, 2006

Giovinazzi, S. and Lagomarsino, S. (2002). WP04: Guidelines for the implementation of the I level methodology for the vulnerability assessment of current buildings. Genoa, Italy.

Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Rumiñahui. 2012, Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial Cantón Rumiñahui 2012 – 2025.

Gómez, A. A., & Salcedo, E. (2002). Leyes de atenuación de la intensidad macrosísmica en Colombia. *Revista Geofísica Colombiana*, 6, 53-61.

Grünthal, G. (Ed.). (1993). European macroseismic scale 1992: updated MSK scale (Vol. 7). European Seismological Commission, Subcommission on Engineering Seismology, Working Group Macroseismic scale.

Grünthal, G. (Ed.). (1993). European macroseismic scale 1992: updated MSK scale (Vol. 7). European Seismological Commission, Subcommission on Engineering Seismology, Working Group Macroseismic scale.

Idriss, I. M., 2013. NGA-West2 Model for Estimating Average Horizontal Values of PseudoAbsolute Spectral Accelerations Generated by Crustal Earthquakes, PEER Report No. 2013/08, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA, 31 pp

Instituto Geofísico Escuela Politécnica Nacional., 2013: Sismicidad 1990-2009.

Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). 2014. Resultados del Censo 2010.

Kanno, T., Narita, A., Morikawa, N., Fujiwara, H., & Fukushima, Y. (2006). A new attenuation relation for strong ground motion in Japan based on recorded data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(3), 879-897.

Lagomarsino, S. y S. Giovinazzi. 2006, "Macroscopic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings". *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 4, pp. 415-443.

Lantada, N., Pujades, L., & Barbat, A. (2007). Evaluación del riesgo sísmico mediante métodos avanzados y técnicas GIS. Aplicación a la ciudad de Barcelona (Doctoral dissertation, Dissertation. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, Spain).

Leonard, M (2010), “Earthquake Fault Scaling: Self-Consistent Relating of Rupture length, Width, Average Displacement, and Moment Release”

Lin, P. S., & Lee, C. T. (2008). Ground-motion attenuation relationships for subduction-zone earthquakes in northeastern Taiwan. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98(1), 220-240.

Lomnitz, C. (1974). Earthquakes and reservoir impounding: State of the art. *Engineering Geology*, 8(1), 191-198.

Martínez, S. 2015. Comunicación personal

Martínez, S 2014. “Evaluación de la vulnerabilidad sísmica urbana basada en tipologías constructivas y disposición urbana de la edificación. Aplicación en la ciudad de Lorca, Región de Murcia.”

Martínez, S (2012) Evaluación de la vulnerabilidad sísmica urbana basada en tipologías constructivas y disposición urbana de la edificación. Aplicación en la ciudad de Lorca, Región de Murcia. Universidad Politécnica de Madrid.

MCVERRY, G. H., ZHAO, J. X., ABRAHAMSON, N. A., & SOMERVILLE, P. G. (2006). New Zealand acceleration response spectrum attenuation relations for crustal and subduction zone earthquakes. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 39(1), 1-58

Medvedev, S. V. (1977). Seismic intensity scale MSK-76. *Publ. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc*, 117, 95-102.

Mejía-Navarro, M., Wohl, E. E., & Oaks, S. D. (1994). Geological hazards, vulnerability, and risk assessment using GIS: model for Glenwood Springs, Colorado. *Geomorphology*, 10(1), 331-354.

Mena, U., 2002. Evaluación del Riesgo Sísmico en Zonas Urbanas., 10p., Artículo en línea

Milutinovic, Z. V., & Trendafiloski, G. S. (2003). Risk-UE An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different european towns. Contract: EVK4-CT-2000-00014, WP4: Vulnerability of Current Buildings.

Mouroux, P., Bertrand, M., Bour, M., Brun, B. L., Depinois, S., Masure, P. y Risk-UEteam (2004). The European Risk-UE Project: an advanced approach to earthquake risk scenarios. Proceedings of the 13th World Conference Earthquake Engineering, Vancouver B.C (Canadá), CD-ROM, Paper No. 3329.

MURPHY, JR u; O'BRIEN, L. J. The correlation of peak ground acceleration amplitude with seismic intensity and other physical parameters. Bulletin of the Seismological Society of America, 1977, vol. 67, no 3, p. 877-915.

NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN, N. E. C. (2000). Ministerio de desarrollo urbano y vivienda.

NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN, N. E. C. (2011). Ministerio de desarrollo urbano y vivienda.

NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN, N. E. C. (2015). Ministerio de desarrollo urbano y vivienda.

Olaya, V. (2009). Sistemas de información geográfica. Cuadernos internacionales de tecnología para el desarrollo humano, (8), 15.

ONU, E. (2004). Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres. Vivir con el Riesgo. Informe mundial sobre iniciativas para la reducción de desastres. Parte, 5, 383-369.

Ortiz Panchi Oscar Cristian. (2013). Sismotectónica y Peligrosidad Sísmica en Ecuador. Madrid / Facultad: Ciencias Geológicas- Universidad Complutense de Madrid 46 p.

Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial 2012 -2025, GAD Rumiñahui.

Programa de Naciones Unidad para el Desarrollo en el año 2013

Reid, H. F. (1910). The mechanics of the earthquake (Vol. 2). Carnegie institution of Washington.

Risk-UE(2003), An advanced approach to earthquake RISK scenarios with applications to different European towns. European Commission 5FP - City of Tomorrow and Cultural Heritage. CEC Contract Number: EVK4-CT-2000-

00014. Duration: 44 Months (15/01/2001 30/09/2004), <http://www.risk-ue.net/> (último acceso 23 de marzo de 2007)

Rivadeneira, F., Segovia, M., Alvarado, A., Egred, J., Troncoso, L., Vaca, S., Yepes, H., 2007. Serie el riesgo sísmico en el Ecuador. Breves fundamentos sobre los terremotos en el Ecuador. Corporación Editora Nacional, IG-EPN.

Rivas Medina, A., Gaspar Escribano, J. M., Benito Oterino, B., & García Rodríguez, M. J. (2010). Evaluación del riesgo sísmico con técnicas de información geográfica. Aplicación en Navarra. *Mapping*, (144), 6-18.

Rivas-Medina, A., Aguiar, R., Benito, M. B., Escribano, J. M. G., & Parra, H. (2014). Determinación del período de recurrencia y magnitud máxima para el control de las estructuras en el rango elástico ante un sismo asociado a las fallas inversas de Quito.

Rivas-Medina, A., Gaspar-Escribano, J. M., Benito, B., & Bernabé, M. A. (2013). The role of GIS in urban seismic risk studies: application to the city of Almería (southern Spain). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(11), 2717.

Roldós Farías, P. B. (2012). Implementación de conexiones calificadas viga-columna en porticos no arriostrados especiales de acero resistentes a momento en el Ecuador.

Sadigh, K., Chang, C. Y., Egan, J. A., Makdisi, F., & Youngs, R. R. (1997). Attenuation relationships for shallow crustal earthquakes based on California strong motion data. *Seismological research letters*, 68(1), 180-189.

Saragoni, R. (1982). Características experimentales de los movimientos sísmicos sudamericanos.

Stirling, M. W., Mc Verry, G. H., & Berryman, K. R. (2002). A new seismic hazard model for New Zealand. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(5), 1878-1903.

Stirling, M., Gerstenberger, M., Litchfield, N., McVerry, G., Smith, W., Pettinga, J., & Barnes, P. (2008). Seismic hazard of the Canterbury region, New Zealand:

New earthquake source model and methodology. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 41(2), 51-67

The United Nations office for Disaster Risk Reduction UNISDR 2008

The United Nations office for Disaster Risk Reduction UNISDR 2015. World Natural Disasters (Flood & Earthquake) Prevention Conference 2015

Tibanlombo Illanes, J. P., & Villacís Chiluisa, A. B. (2013). Aplicación y sistematización de la propuesta metodológica para el análisis de vulnerabilidad de la Parroquia Sangolquí, del Cantón Rumiñahui (Doctoral dissertation, SANGOLQUÍ/ESPE/2013).

Trifunac, M. D., & Brady, A. G. (1975). On the correlation of seismic intensity scales with the peaks of recorded strong ground motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 65(1), 139-162.

UNDRO, 1980. Natural disasters and vulnerability analysis. Report Expert Group Meeting, Geneva, 49 Pp.

Wells, D. L., & Coppersmith, K. J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the seismological Society of America*, 84(4), 974-1002.

Wood, N. J., & Good, J. W. (2004). Vulnerability of port and harbor communities to earthquake and tsunami hazards: The use of GIS in community hazard planning. *Coastal Management*, 32(3), 243-269.

Yepez, H., Chatelain, J., Guillier, B., 2015. Estudio del riesgo sísmico en el Ecuador, 161 p., Artículo en línea.

Zhao J., Zhang J., Asano A., Ohno Y., Oouchi T., Takahashi T., Ogawa H., Irikura K., Thio H., Somerville P., Fukushima Y., and Fukushima Y., (2006), "Attenuation relations of strong ground motion in Japan using site classification based on predominant period", *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96 (3), 898-913.