



**Estudio de riesgo sísmico para el Barrio San Enrique de Velasco de la
ciudad de Quito**

Carvajal Encalada, Karol Priscilla y Guevara Velasteguí, Carlos Antonio

Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Civil

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Civil

Ing. Haro Báez, Ana Gabriela. PhD.

8 de marzo del 2021



Document Information

Analyzed document Trabajo de titulación Carvajal_Guevara.pdf (D97258208)

Submitted 3/4/2021 9:58:00 PM

Submitted by

Submitter email kpcarvajal1@espe.edu.ec

Similarity 4%

Analysis address agharo.espe@analysis.arkund.com

**ANA
GABRIELA
HARO BAEZ**

Digitally signed by
ANA GABRIELA HARO
BAEZ
Date: 2021.03.05
15:26:05 -05'00'

Sources included in the report

| | | |
|-----------|--|----|
| W | URL: https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/13329/JuanCamilo_Hinestroza ... Fetched: 12/1/2019 3:40:48 PM | 17 |
| SA | 1 GUIA DE REFORZAMIENTO DE ESTRUCTURAS INFORMALES APORTICADAS.pdf Document 1 GUIA DE REFORZAMIENTO DE ESTRUCTURAS INFORMALES APORTICADAS.pdf (D29452901) | 5 |
| W | URL: https://core.ac.uk/download/pdf/128483588.pdf Fetched: 1/10/2021 8:45:33 PM | 2 |
| SA | TESIS THEO.docx Document TESIS THEO.docx (D59607318) | 2 |
| W | URL: https://core.ac.uk/download/pdf/75996042.pdf Fetched: 12/17/2020 1:56:49 AM | 4 |
| W | URL: https://core.ac.uk/download/pdf/47250371.pdf Fetched: 7/6/2020 5:37:29 PM | 4 |
| SA | PLAN DE TESIS CORRIGIENDO PARA TURNITL.docx Document PLAN DE TESIS CORRIGIENDO PARA TURNITL.docx (D75733869) | 1 |
| SA | TESIS_FINAL.docx Document TESIS_FINAL.docx (D73462674) | 1 |
| W | URL: https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1548&context=ing_civil Fetched: 7/15/2020 2:17:23 AM | 1 |



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**Estudio de riesgo sísmico para el Barrio San Enrique de Velasco de la ciudad de Quito** ” fue realizado por los señores **Carvajal Encalada Karol Priscilla** y **Guevara Velasteguí Carlos Antonio** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 8 de marzo del 2021

Firma:

**ANA GABRIELA
HARO BAEZ**

Digitally signed by ANA
GABRIELA HARO BAEZ
Date: 2021.03.08 14:29:50 -05'00'

Ing. Haro Báez, Ana Gabriela, PhD

C.C: 1713500302



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Nosotros, **Carvajal Encalada, Karol Priscilla**, y **Guevara Velasteguí, Carlos Antonio**, con cédulas de ciudadanía n° 1004049258 y n° 1723881890 respectivamente, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“Estudio de riesgo sísmico para el Barrio San Enrique de Velasco de la ciudad de Quito”** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 8 de marzo del 2021

Carvajal Encalada Karol Priscilla
CC: 1004049258

Guevara Velasteguí Carlos Antonio
CC: 1723881890



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Nosotros, **Carvajal Encalada, Karol Priscilla** y **Guevara Velasteguí, Carlos Antonio** con cédulas de ciudadanía n° 1004049258 y n° 1723881890 respectivamente, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“Estudio de riesgo sísmico para el Barrio San Enrique de Velasco de la ciudad de Quito”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 8 de marzo del 2021

Carvajal Encalada Karol Priscilla

CC: 1004049258

Guevara Velasteguí Carlos Antonio

CC: 1723881890

Dedicatoria

A mis padres,

Elmer y Rubí, por el amor incondicional, la paciencia y por inducirme por el camino del bien, con valores éticos y morales durante toda mi vida personal y profesional, siendo mi guía y apoyo en los momentos más difíciles, es una bendición para mí tenerlos a mi lado en cada paso que he dado y es un honor dedicarles este trabajo siendo ustedes el motor que me impulsa día a día a salir adelante.

A mis hermanos,

Joel y Alejandro por ser mis compañeros de vida que siempre están a mi lado, a pesar de nuestras diferencias el apoyo y amor es siempre incondicional.

A mi familia,

Abuelitos, tíos, tías, primos y primas que me han apoyado y han estado conmigo en los momentos más difíciles, dándome un consejo y palabras de aliento a lo largo de mi vida les dedico con todo mi amor.

Karol Priscilla Carvajal Encalada

Dedicatoria

Dedico este trabajo a Dios, por ser la guía y el camino en mi vida.

Para mis padres Carlos y Mirian que son mi más grande motivación, y han sido mi apoyo incondicional para todos mis proyectos, por siempre cuidar de mí, por el amor, la ternura, la fortaleza, la dedicación y la confianza que han puesto en mí para formar una persona de bien, es una alegría y una bendición inmensa tenerlos, les debo todo en esta vida.

A mi hermano Luis, un apoyo incondicional, por expresar el amor y cariño a su manera, por siempre estar cuando lo necesito.

A mi familia y amigos que han sido parte de mi trayectoria en mi formación académica, para quienes han estado en mis alegrías y más aún en mis momentos difíciles dándome ánimos.

Carlos Antonio Guevara Velasteguí

Agradecimiento

Quiero agradecer a Dios y a la Virgencita del Carmen por ser mi luz durante todo este camino dándome fortalezas ante los momentos difíciles.

A mis padres por ser mi apoyo incondicional durante toda mi vida, gracias por su inmenso amor y por enseñarme a luchar por cumplir mis sueños, todo ha sido gracias a ustedes.

A mi tío Alexis por estar en cada paso que he dado, gracias por su amor y por estar para mí cuando más lo he necesitado, por enseñarme que los sueños si se cumplen.

A mis abuelitos por guiarme con su luz para no rendirme, por su amor y apoyo incondicional, gracias por estar a mi lado, y a mi familia por su apoyo y amor a lo largo de mi vida.

A mis amigos, que con sus buenos deseos, apoyo y motivaciones formaron parte de este objetivo y compartieron gratos momentos en esta etapa universitaria, especialmente a David, Jonathan, Stiven, Gabriel y Antonio gracias por ser parte de esta linda etapa de mi vida.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por permitir formarme en esta prestigiosa institución, a mis docentes por impartir sus conocimientos para la formación de esta linda carrera la Ingeniera Civil. A nuestra tutora la Ing. Anita Haro, PhD., quien nos apoyó, guió e impulsó al desarrollo de este estudio impartiéndonos sus conocimientos.

A Javier por su paciencia y ayuda para obtener parte de la información necesaria para este proyecto y al profesor Peter Pazák, PhD., por orientarnos dentro del software OpenQuake que fue de mucha ayuda para culminar este estudio.

Karol Priscilla Carvajal Encalada

Agradecimiento

Agradezco a Dios por la fortaleza y capacidad que me ha dado para poder lograr mis objetivos.

A mis padres y hermano, por su apoyo incondicional en cada etapa de mi vida, cada oportunidad forjada en mi vida es gracias a ellos.

A mi Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por acogerme para formarme con un profesional de excelencia en el maravilloso mundo de la Ingeniería Civil.

A los docentes de la Carrera de Ingeniería Civil, por su dedicación y por sus enseñanzas, y el amor a la carrera. Especialmente a nuestra tutora, la Ing. Anita Haro, PhD. Quien nos apoyó en el transcurso de todo el proyecto con sus conocimientos y directrices.

Al profesor Peter Pazák, PhD, investigador del Departamento de Sismología en Eslovaquia, cuya ayuda desde el otro lado del mundo fue fundamental para poder culminar este proyecto.

A Jennifer, quien me ha dado aliento y me ha acompañado durante este proceso de formación.

A mis amigos y compañeros con quienes compartimos grandes momentos y han sido parte de mi formación como profesional y como persona.

A todos mis colegas especialmente a los colegas del Byron, por ser parte de una de las mejores etapas de mi vida.

Carlos Antonio Guevara Velasteguí

Índice de Contenido

| | |
|---|-----------|
| Dedicatoria | 6 |
| Dedicatoria | 7 |
| Agradecimiento | 8 |
| Agradecimiento | 9 |
| Índice de Tablas..... | 15 |
| Índice de Figuras | 17 |
| Resumen..... | 21 |
| Abstract | 22 |
| Capítulo I..... | 23 |
| Generalidades | 23 |
| Introducción..... | 23 |
| Antecedentes | 24 |
| Planteamiento del problema | 26 |
| Macro | 26 |
| Meso | 27 |
| Micro | 28 |
| Área de Estudio..... | 29 |
| Población Barrio San Enrique de Velasco | 30 |
| Desarrollo Urbano y Uso del Suelo..... | 31 |
| Nivel socioeconómico..... | 33 |
| Justificación e importancia | 35 |
| Objetivos Generales y Específicos | 36 |
| Objetivo General..... | 36 |
| Objetivos Específicos | 36 |
| Capítulo II..... | 38 |
| Marco Teórico y Datos Censales | 38 |

| | |
|--|----|
| Evaluación del Riesgo Sísmico - Proyecto SARA..... | 38 |
| Zona sísmica en el Ecuador | 38 |
| Amenaza sísmica en Quito | 40 |
| Modelo de amenaza sísmica..... | 41 |
| Variabilidad de la intensidad | 44 |
| Modelo de Exposición..... | 45 |
| Elementos de un modelo de exposición | 46 |
| Área construida..... | 46 |
| Número de pisos | 46 |
| Sistemas estructurales | 47 |
| Clasificación para Tipologías Estructurales..... | 47 |
| Tipologías de Concreto (CR+CIP) | 50 |
| Tipologías de Acero (STEEL-S+S99)..... | 52 |
| Tipologías de Mampostería..... | 53 |
| Mampostería confinada (MCF+CBH)..... | 53 |
| Mampostería Reforzada (MR)..... | 54 |
| Mampostería no reforzada (MUR + CBH/+CLBRS) | 54 |
| Tipología de Mampostería de Adobe (MUR+ADO) | 55 |
| Vulnerabilidad..... | 56 |
| Modelo de consecuencias..... | 57 |
| Riesgo Sísmico | 58 |
| Cálculo de Riesgo Sísmico..... | 58 |
| Integración del Modelo de Amenaza Sísmica | 59 |
| Integración del Modelo de exposición..... | 59 |
| Efectos de sitio | 59 |
| Integración de Fragilidad..... | 59 |
| Integración de Vulnerabilidad..... | 60 |

| | |
|--|------------|
| Análisis de escenarios sísmicos | 60 |
| Capítulo III..... | 61 |
| Amenaza Sísmica..... | 61 |
| Catálogos sísmicos del sitio de análisis | 62 |
| Caracterización de la sismicidad | 65 |
| Ecuaciones de Atenuación | 69 |
| Atkinson & Boore 2008..... | 72 |
| Bindi et al 2011 | 73 |
| Akkar & Boomer 2010..... | 74 |
| Efectos de sitio | 74 |
| Clasificación de los suelos | 77 |
| Clasificación de los suelos según la NEC15 | 81 |
| Modelo de amenaza Sísmica..... | 81 |
| Elaboración de la base de datos georreferenciada | 82 |
| Escenario de amenaza sísmica | 84 |
| Ruptura | 86 |
| Nivel de truncamiento..... | 88 |
| Cálculo en el programa OpenQuake | 90 |
| Modelo de resultados Qgis..... | 91 |
| Modelo Akkar & Bommer 2010 | 91 |
| Modelo Atkinson & Boore 2008..... | 94 |
| Modelo Bindi et al 2011 | 97 |
| Capítulo IV | 101 |
| Modelo de Exposición..... | 101 |
| Recopilación de datos..... | 101 |
| Nivel de resolución del modelo de exposición | 101 |
| Datos Catastrales..... | 102 |

| | |
|--|------------|
| Levantamiento de Datos Complementarios | 105 |
| Ductilidad..... | 108 |
| Resultados de los levantamientos | 109 |
| Tipología Estructural | 118 |
| Tipologías Hormigón Armado o Concreto reforzado | 122 |
| Hormigón Armado o concreto reforzado hecho en sitio, con mampostería de relleno y losa plana alivianada o maciza, no dúctil..... | 122 |
| Hormigón Armado o concreto reforzado hecho en sitio, con mampostería de relleno y losa plana alivianada o maciza, dúctil..... | 123 |
| Hormigón Armado o Concreto reforzado hecho en sitio, con mampostería de relleno en pórticos con vigas descolgadas, dúctil..... | 124 |
| Tipologías de Mampostería..... | 125 |
| Mampostería no reforzada de bloque hueco de hormigón o ladrillo, no dúctil. | 125 |
| Mampostería no reforzada de adobe, no dúctil. | 126 |
| Mampostería confinada en bloque o ladrillo, no dúctil | 127 |
| Tipología de Acero | 128 |
| Tipología o sistema desconocido..... | 128 |
| Costos de reposición..... | 129 |
| Cálculo del costo de reposición | 133 |
| Resultados del modelo de exposición más probable (M0) | 135 |
| Variabilidad en el Modelo de Exposición..... | 139 |
| Confusión de las tipologías estructurales | 140 |
| Resultados de los modelos de exposición | 146 |
| Capítulo V | 148 |
| Vulnerabilidad | 148 |
| Vulnerabilidad..... | 148 |
| Estados de Daño | 148 |
| Curvas de fragilidad | 150 |

| | |
|--|------------|
| Curvas de fragilidad (Villar-Vega et al., 2017) | 151 |
| Curvas de fragilidad Liao (2006) | 156 |
| Modelo de consecuencias | 157 |
| Modelo de Vulnerabilidad | 158 |
| Capítulo VI | 161 |
| Evaluación del riesgo sísmico | 161 |
| Software OpenQuake para Evaluación del riesgo sísmico | 161 |
| Resultados de Riesgo sísmico usando modelo de exposición más probable..... | 161 |
| Análisis de resultados de riesgo sísmico | 161 |
| Variabilidad de las pérdidas económicas y daños al considerar la incertidumbre del modelo de exposición. | 170 |
| Capítulo VII | 178 |
| Conclusiones y Recomendaciones | 178 |
| Conclusiones | 178 |
| Recomendaciones | 180 |
| Referencia Bibliográfica..... | 181 |
| Anexos | 187 |

Índice de Tablas

| | |
|---|-----|
| Tabla 1 Población por sexo de la Parroquia San Enrique de Velasco | 31 |
| Tabla 2 Uso residencial y múltiple | 33 |
| Tabla 3 Clases Sociales en función de índices difusos. | 33 |
| Tabla 4 Tipologías de acuerdo a su material y tecnología de construcción. | 49 |
| Tabla 5 Sistemas de Resistencia Lateral..... | 49 |
| Tabla 6 Catálogos sísmicos en la ciudad de Quito | 64 |
| Tabla 7 Caracterización de los segmentos del sistema de fallas Quito..... | 67 |
| Tabla 8 Niveles de amenaza sísmica | 68 |
| Tabla 9 Ecuaciones de predicción de movimiento (GMPE) usadas en el modelo de amenaza sísmica del proyecto SARA..... | 70 |
| Tabla 10 Valores de Vs30 en diferentes puntos de la ciudad de Quito | 77 |
| Tabla 11 Zonas de suelos con sus respectivas características | 79 |
| Tabla 12 Períodos de vibración en cada zona de suelo | 79 |
| Tabla 13 Clasificación de los perfiles de suelo..... | 81 |
| Tabla 14 Organización del sistema de información geográfica de la ciudad de Quito... .. | 83 |
| Tabla 15 Puntos del polígono | 85 |
| Tabla 16 Puntos extremos de la falla Ilumbisí – La Bota en coordenadas UTM..... | 86 |
| Tabla 17 Coordenadas geográficas de la falla ILB..... | 87 |
| Tabla 18 Resultados del modelo de amenaza sísmica..... | 100 |
| Tabla 19 Información Cartográfica proporcionada por la Secretaría de Planificación de Hábitat y Vivienda de Quito. | 103 |
| Tabla 20 Cantidad de edificaciones de acuerdo a su tipología estructural y número de pisos..... | 121 |
| Tabla 21 Distribución porcentual de edificaciones de acuerdo al número de pisos de cada tipología estructura. | 121 |
| Tabla 22 Distribución de tipologías estructurales del Barrio San Enrique de Velasco. | 122 |
| Tabla 23 Valor unitario de construcción por m2 según el tipo de estructura, condición de la propiedad, rango de pisos y acabados | 131 |
| Tabla 24 Acabados exteriores con su respectiva clasificación | 132 |
| Tabla 25 Rangos para establecer las categorías de acabados según la sumatoria de pesos..... | 133 |
| Tabla 26 Calificación de los acabados de la tipología CR+CIP/LFLINF+DUC/HEX:2,3,4,5 | 133 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 27 Tabla resumen del costo por m2 de cada tipología estructural | 134 |
| Tabla 28 Tipologías estructurales, área construida y costo de reposición para la opción más probable del modelo de exposición..... | 136 |
| Tabla 29 Matriz de variación de tipologías estructurales | 142 |
| Tabla 30 Asignación de curvas de fragilidad a las taxonomías del Barrio San Enrique de Velasco | 151 |
| Tabla 31 Modelo de Consecuencia | 157 |
| Tabla 32 Pérdidas como porcentaje del costo de reposición..... | 164 |
| Tabla 33 Porcentaje de estructuras de cada tipología estructural por pisos, de acuerdo a su estado de daño. | 165 |
| Tabla 34 Porcentaje de estructuras de cada tipología estructural, de acuerdo a su nivel de daño. | 165 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 Mapa de ubicación del Barrio San Enrique de Velasco | 29 |
| Figura 2 Mapa de sectores y zonas censales Barrio San Enrique de Velasco | 30 |
| Figura 3 Mapa de índices difusos año 2010 | 34 |
| Figura 4 Fuentes sísmicas de tipo subducción | 39 |
| Figura 5 Fuentes sísmicas tipo corticales | 40 |
| Figura 6 Distancia fuente- emplazamiento | 43 |
| Figura 7 Variabilidad de la intensidad | 45 |
| Figura 8 Fotografía de una edificación de concreto reforzado vaciado in situ, con un sistema de resistencia lateral compuesto por pórticos rellenos de mampostería de bloque adosada al pórtico..... | 51 |
| Figura 9 Edificación con sistema de resistencia lateral relleno en mampostería de bloque con losa plana alivianada. | 52 |
| Figura 10 Estructura mixta con elementos de acero y mampostería de bloque | 53 |
| Figura 11 Vivienda en Mampostería confinada..... | 54 |
| Figura 12 Tipología de Mampostería No reforzada de Bloque de Concreto | 55 |
| Figura 13 Tipología en estructura de mampostería de Adobe, no reforzado. | 56 |
| Figura 14 Catálogo de terremotos unificado | 62 |
| Figura 15 Sismos registrados 1900-2012 | 63 |
| Figura 16 Sismos asociados a las fallas ciegas de Quito..... | 66 |
| Figura 17 Curvas de peligro sísmico, Quito | 69 |
| Figura 18 Modelo GMPEs..... | 72 |
| Figura 19 Velocidad de la onda de corte y períodos de vibración..... | 76 |
| Figura 20 Zona de suelos similares..... | 78 |
| Figura 21 Ubicación de los puntos de estudio de los suelos | 80 |
| Figura 22 Mapa del Barrio San Enrique de Velasco, falla inversa de Quito Ilumbisí- La Bota y polígono donde se calculará las intensidades del terreno realizado en el software Qgis. | 85 |
| Figura 23 Mapa de ruptura y Barrio San Enrique de Velasco | 88 |
| Figura 24 Variabilidad de la intensidad | 89 |
| Figura 25 Diagrama de flujo para un escenario sísmico en OpenQuake..... | 90 |
| Figura 26 Valores de PGA en el modelo Akkar & Bommer 2010 | 91 |
| Figura 27 Valores de Sa 0.3 en el modelo Akkar & Bommer 2010 | 92 |
| Figura 28 Valores de Sa 1.0 en el modelo Akkar & Bommer 2010 | 92 |

| | |
|---|-----|
| Figura 29 Valores de PGA en el modelo Akkar & Bommer 2010 | 93 |
| Figura 30 Valores de Sa 0.3 en el modelo Akkar & Bommer 2010 | 93 |
| Figura 31 Valores de Sa 1.0 en el modelo Akkar & Bommer 2010 | 94 |
| Figura 32 Valores de PGA para el modelo de Atkinson & Boore 2008 | 94 |
| Figura 33 Valores de Sa 0.3s para el modelo de Atkinson & Boore 2008 | 95 |
| Figura 34 Valores Sa 1.0s para el modelo de Atkinson & Boore 2008 | 95 |
| Figura 35 Valores de PGA para el modelo de Atkinson & Boore 2008 | 96 |
| Figura 36 Valores de Sa 0.3 para el modelo de Atkinson & Boore 2008 | 96 |
| Figura 37 Valores de Sa 1.0 para el modelo de Atkinson & Boore 2008 | 97 |
| Figura 38 Valores de PGA para el modelo de Bindi et al 2011 | 97 |
| Figura 39 Valores de Sa 0.3 para el modelo de Bindi et al 2011 | 98 |
| Figura 40 Valores de Sa 1.0 para el modelo de Bindi et al 2011 | 98 |
| Figura 41 Valores PGA para el modelo de Bindi et al 2011 | 99 |
| Figura 42 Valores de Sa 0.3 para el modelo de Bindi et al 2011 | 99 |
| Figura 43 Valores de Sa 1.0 para el modelo de Bindi et al 2011 | 100 |
| Figura 44 Lugar de despegue y control del dron. | 106 |
| Figura 45 Fotografía aérea Barrio San Enrique de Velasco | 106 |
| Figura 46 Mapa de Ubicación de las construcciones y predios del Barrio San Enrique de Velasco | 108 |
| Figura 47 Porcentaje y cantidad de edificaciones de acuerdo a su ocupación..... | 110 |
| Figura 48 Cantidad y porcentajes de edificaciones por altura de pisos. | 111 |
| Figura 49 Cantidad y porcentaje de edificaciones por tipo de material..... | 112 |
| Figura 50 Edificio con Irregularidad Torsional en Planta | 113 |
| Figura 51 Irregularidad en planta de tipo esquina reentrante..... | 113 |
| Figura 52 Estructura con Pisos blandos..... | 114 |
| Figura 53 Estructuras con Irregularidad y cambios en elevación | 115 |
| Figura 54 Edificaciones en las que se produce martilleo..... | 115 |
| Figura 55 Porcentaje de estructuras Regulares e Irregulares en planta. | 116 |
| Figura 56 Porcentaje y cantidad de edificaciones regulares e irregulares en elevación. | 117 |
| Figura 57 Cantidad y Porcentaje de Edificaciones de acuerdo a su sistema de resistencia de cargas laterales (SRCL) | 118 |
| Figura 58 Cantidad de edificaciones de acuerdo a cada tipología estructural..... | 119 |
| Figura 59 Porcentaje de edificaciones de acuerdo a su tipología estructural | 120 |

| | |
|---|-----|
| Figura 60 Tipología de Concreto reforzado hecho en sitio con relleno en mampostería de bloque, no dúctil..... | 123 |
| Figura 61 Estructura de hormigón armado o concreto reforzado hecho en sitio, con pórticos rellenos de mampostería y losa plana, dúctil. | 124 |
| Figura 62 Estructuras de concreto reforzado hecho en sitio con mampostería de relleno, y sistema de pórticos con vigas descolgadas, dúctil. | 125 |
| Figura 63 Estructura de mampostería no reforzada, no dúctil..... | 126 |
| Figura 64 Estructura en mampostería de adobe, no dúctil. | 127 |
| Figura 65 Estructura de mampostería confinada, no dúctil. | 128 |
| Figura 66 Estructura con un sistema de resistencia lateral desconocido, no dúctil. | 129 |
| Figura 67 Tipologías estructurales y cantidad de edificaciones para el modelo de exposición más probable. | 137 |
| Figura 68 Área construida (m ²) del Modelo de exposición más probable. M0 | 137 |
| Figura 69 Costo de reposición del modelo de exposición M0 en dólares. | 138 |
| Figura 70 Tipologías generales del sector de estudio | 139 |
| Figura 71 Nivel de incertidumbre en la asignación de las tipologías estructurales..... | 141 |
| Figura 72 Cantidad de Edificaciones para cada modelo de exposición. | 146 |
| Figura 73 Área de construcción de acuerdo al modelo de exposición. | 147 |
| Figura 74 Costos de reposición de los modelos de exposición de acuerdo a sus tipologías estructurales..... | 147 |
| Figura 75 Estados de daño..... | 149 |
| Figura 76 Función Continua | 150 |
| Figura 77 CR/LFINF+DUC/HEX:1/RES | 153 |
| Figura 78 CR/LFINF+DNO/HEX:1/RES | 153 |
| Figura 79 MCF/LWAL+DNO/HEX:1/RES..... | 154 |
| Figura 80 MUR+ADO/LWAL+DNO/HEX:1/RES | 154 |
| Figura 81 MUR/LWAL+DNO/HEX:1/RES | 155 |
| Figura 82 UNK-RES (GEM)..... | 155 |
| Figura 83 SRC/LFM/HBET:1,3 | 156 |
| Figura 84 Modelos de vulnerabilidad..... | 158 |
| Figura 85 Curva de vulnerabilidad CR/LFINF+DUC | 159 |
| Figura 86 Curva de vulnerabilidad CR/LFINF+DNO..... | 159 |
| Figura 87 Curva de vulnerabilidad MUR+ADO/HBET:1 | 160 |
| Figura 88 Curva de vulnerabilidad UNK..... | 160 |

| | |
|--|-----|
| Figura 89 Pérdidas económicas para escenario de corteza superficial para cada tipología, de acuerdo a cada modelo de movimiento del terreno..... | 163 |
| Figura 90 Pérdida económica promedio total de cada modelo de movimiento fuerte para un escenario de corteza superficial..... | 164 |
| Figura 91 Porcentajes de estado de daño de las edificaciones por tipología estructural..... | 166 |
| Figura 92 Edificaciones por tipología estructural de acuerdo a su nivel de daño. | 167 |
| Figura 93 Porcentajes de daño esperado para el modelo M0..... | 167 |
| Figura 94 Mapa de edificaciones con probabilidad de alcanzar o superar estados de daño leve..... | 168 |
| Figura 95 Mapa de edificaciones con probabilidad de alcanzar o exceder estados de daño moderado..... | 169 |
| Figura 96 Mapa de edificaciones con probabilidad de alcanzar o superar estados de daño extensivo. | 169 |
| Figura 97 Mapa de edificaciones con riesgo de colapso. | 170 |
| Figura 98 Resultados en pérdidas económicas para un escenario cortical 475 de cada modelo de exposición respecto del modelo más probable M0..... | 171 |
| Figura 99 Resultados de daño completo o colapsos en edificaciones para un escenario cortical 475 y su variación porcentual. | 173 |
| Figura 100 Resultados de edificaciones probables sin daño para un escenario cortical 475. Variación porcentual de edificaciones sin daño con respecto al modelo más probable M0. | 174 |
| Figura 101 Resultados de edificaciones con probabilidad de alcanzar o superar daños leves para un escenario cortical 475. Variación porcentual de edificaciones sin daño con respecto al modelo más probable M0. | 175 |
| Figura 102 Resultados de edificaciones con probabilidad de alcanzar o superar daños moderados para un escenario cortical 475 y la variación porcentual de edificaciones sin daño con respecto al modelo más probable M0. | 176 |
| Figura 103 Resultados de edificaciones con probabilidad de alcanzar o superar daños extensivos para un escenario cortical 475 variación porcentual de edificaciones sin daño con respecto al modelo más probable M0. | 177 |

Resumen

Se presenta un estudio de riesgo sísmico del Barrio San Enrique de Velasco de la parroquia urbana El Condado de la ciudad de Quito, debido a la informalidad de sus construcciones que representan un riesgo significativo ante un evento sísmico, dichos resultados puedan servir como información base para futuros planes de contingencia. Se utilizó el software de acceso libre OpenQuake con la integración de los modelos de amenaza, exposición y vulnerabilidad, para su ejecución se obtuvo información de catálogos sísmicos, datos censales de población y vivienda, información cartográfica disponible e información catastral, además el levantamiento de información remota con el uso de la plataforma Google Street View y el uso de un dron profesional para completar la información requerida de las edificaciones de una manera más eficiente. En el modelo de amenaza se calculó los campos de movimiento del terreno, en base a ecuaciones de atenuación que se adaptan al sector de estudio calculando la mediana de la intensidad más una componente de variabilidad aleatoria. En el modelo de exposición se definen las tipologías estructurales existentes y se determinan costos de reposición de las estructuras. En el modelo de la vulnerabilidad se representó por medio de curvas de fragilidad que a través del modelo de consecuencias permitió determinar estados de daños probables y pérdidas económicas. Los resultados obtenidos muestran que el 13.72% de edificaciones podrían sufrir estados de daño completo y que las pérdidas económicas por daños estructurales son del 53% del costo de reposición.

PALABRAS CLAVE

- **AMENAZA**
- **EXPOSICIÓN**
- **VULNERABILIDAD**
- **ESTADOS DE DAÑO**
- **PÉRDIDAS ECONÓMICAS**

Abstract

This thesis illustrates a seismic risk study of the neighborhood of San Enrique de Velasco in the urban parish of El Condado in Quito city. It has developed during many years informal construction everywhere which involve high-risk levels of catastrophic events, the results obtained can help the authorities to create a contingency plan in the future. To establish a seismic risk analysis in this sector's buildings, three models were integrated and execute into an OpenQuake software. The models are: hazard, exposure and vulnerability. All the data used in the program was obtained from seismic catalogs, population and housing census data, available cartographic information, cadastral information as well as remote data collection by using the Google Street View platform and the use of professional drone. This platform allows to gather important and accurate data information required from the buildings. In the hazard model, the ground motion fields were calculated, based on attenuation equations that are adapted to the study sector, calculating the median intensity plus a component of random variability. In the exposure model the existing structural typologies are defined, and replacement costs of the structures are determined. In the vulnerability model, it was represented by fragility curves that, through the consequences model, made it possible to determine states of probable damage and economic losses. In Conclusion, the results obtained show that 13.72% of buildings could suffer complete damage or collapse, and the economic losses due to structural damage are 53% of the replacement cost.

KEYWORDS:

- **HAZARD**
- **EXPOSURE**
- **VULNERABILITY**
- **DAMAGE STATES**
- **ECONOMIC LOSSES**

Capítulo I

Generalidades

Introducción

En el presente proyecto se realizará un estudio de riesgo sísmico del barrio San Enrique de Velasco ubicado en la parroquia urbana El Condado en la ciudad de Quito, debido a la importancia de conocer por parte de entidades municipales como de habitantes de la comunidad de manera cuantitativa el riesgo al que la zona está expuesta por factores geográficos y sismogénicos, ya que la información que se obtiene con el presente proyecto servirá para futuros planes de contingencia y propuestas de reforzamiento para edificaciones que tienen un mayor grado de exposición ante movimientos telúricos.

El estudio de riesgo sísmico a realizar se compone de la integración de tres fases, modelo de amenaza, exposición y vulnerabilidad. Para lo cual se realizan las siguientes actividades previas, la recopilación de catálogos sísmicos necesarios para el estudio de amenaza sísmica, recopilación de información cartográfica de la zona de estudio, además de la información catastral disponible que permita obtener las características constructivas que servirán para clasificar de acuerdo a las tipologías estructurales del sector de estudio, el uso de la plataforma digital Google Street View, herramienta que permite recorrer las calles de la ciudad de manera virtual, facilitando recopilar información a partir de la observación externa de las edificaciones, la cual se relacionarán con los resultados del censo del INEC de Población y Vivienda de 2010, además del proyecto SARA y con información que pueda servir de referencia.

Con estas actividades descritas además de la incorporación de otros parámetros de relevancia que se detallan durante el desarrollo del proyecto, se procede a procesar la información recopilada para realizar modelos de exposición y modelos de vulnerabilidad, para finalmente realizar el estudio y cuantificar el riesgo sísmico con la ayuda del programa OpenQuake patrocinado por Global Earthquake Model (GEM), el cual es un software de código abierto que permitirá modelar, ver, explorar y gestionar el riesgo de terremotos, el motor detrás de la plataforma comprende un conjunto de calculadoras que contribuyen de manera única en el área de evaluación y mitigación en riesgos sísmicos.

Antecedentes

El hombre ha intentado “predecir” la ocurrencia de eventos naturales, lamentablemente no se ha podido llegar a esta respuesta sin embargo el avance de la ciencia y la investigación permite el desarrollo de estudios que si bien no predicen situaciones como sismos, deslizamientos de tierra, inundaciones, erupciones volcánicas, y todo tipo de eventos potencialmente destructivos, pueden informar y concientizar a la gente en el riesgo que cierta población, ciudad o país presenta ante un acontecimiento de estas magnitudes (Silva, 2017).

El Ecuador está situado en el Cinturón de Fuego del Pacífico, el cual debido a su característica geológica presenta un alto riesgo sísmico, su capital la ciudad de Quito se encuentra asentada sobre una falla longitudinal de 45 Km que atraviesa la ciudad, además presenta un gran número de construcciones informales que no cumplen con las

normas sismorresistentes presentando un alto riesgo ante un movimiento telúrico (Chávez, 2016).

El 16 de abril de 2016, la zona costera del Ecuador sufrió el evento sísmico de magnitud de 7.8 en la escala sísmica de Richter (cuyo epicentro fue en el cantón de Pedernales), provocando la muerte de 671 personas y más de 8600 damnificadas según los datos oficiales del MIDUVI, es por eso que no solo el sistema de fallas de Quito presentan gran peligro para la ciudad sino también eventos telúricos como este (Chicaiza, 2017).

Las edificaciones de la ciudad de Quito son de tipología heterogénea, el 53% son edificaciones irregulares asociadas a asentamientos precarios, construidas en un entorno físico – geográfico con características geológicas y geomorfológicas. Poseen un elevado número de viviendas informales, este resultado es evidente por la falta de políticas que faciliten el acceso al suelo urbanizado para el sector de bajos ingresos; hechos que se sustentan en que los gobiernos y el mercado no atiende la demanda de esta población de bajos recursos y los incita a que “produzcan hábitat” utilizando los pocos recursos que disponen, incrementando la irregularidad, informalidad y precariedad (Guevara, 2013).

En uno de los proyectos South America Risk Assessment (SARA) por sus siglas en inglés y en conjunto con Fundación Global Earthquake Model (GEM) y la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador han buscado mostrar diferentes zonas de riesgo en base a las tipologías estructurales a través de un mapeo de la ciudad, esta herramienta

es necesaria para que organismos de control puedan proteger las zonas de mayor riesgo en la ciudad (Silva, 2017).

SARA intenta dar un amplio panorama del riesgo de la ciudad ante distintos sismos probables con la finalidad de que autoridades, profesionales y la población en general tomen conciencia de la realidad de la zona y trabajen en conjunto para evitar efectos lamentables a futuro y proponer planes de contingencia para mitigar los efectos destructivos de un evento sísmico.

Planteamiento del problema

Macro

Los terremotos son considerados fenómenos causados por fallas activas hace millones de años, su ocurrencia se puede considerar como una variable estacionaria en el tiempo, es decir que en lugares donde han sucedido grandes sismos, es probable que en el futuro puedan volver a ocurrir eventos de similar magnitud. El riesgo sísmico en el ámbito de los riesgos naturales genera pérdidas económicas y humanas en todo el mundo, este riesgo, dada su difícil predicción requiere de medidas que contribuyan a reducir los efectos negativos en la sociedad, dichas medidas deben estar encaminadas básicamente a las actividades de prevención para evitar que las futuras edificaciones colapsen o sufran daños severos durante un posible sismo y evaluar la vulnerabilidad de las estructuras existentes y conocer el riesgo real de una población (Chávez, 2016).

El Ecuador está expuesto continuamente a peligros geológicos que pueden devenir en desastres, las amenazas naturales en la región andina del país son

principalmente de tipo geológico (sismos, erupciones volcánicas, y deslizamientos) y climático (inundaciones y sequías). Al igual que en otros países latinoamericanos, las políticas habitacionales no han sido concebidas con un enfoque integral de atención a las clases sociales, el crecimiento urbano ha sido progresivo e inevitable, ciudades como Quito albergan cada vez mayor población y elevan la oferta inmobiliaria, hechos que pueden ser traducidos como segregación socio espacial, determinando desequilibrios en el acceso al suelo urbano (Guevara, 2013).

Meso

La ciudad de Quito está expuesta a un alto riesgo sísmico, rodeada de volcanes y con varias fallas tectónicas cruzando sectores urbanos y rurales del Distrito Metropolitano, a pesar de ello un alto número de edificaciones no cuentan con un diseño estructural que respete los parámetros sísmicos mínimos, la mayoría de las edificaciones corresponden a domicilios de dos o tres pisos construidas incluso en sectores de riesgo como laderas o quebradas. El riesgo que en un mediano o largo plazo se presente un sismo de considerable magnitud agrava esta situación (Vásquez, 2015).

El incremento considerable de la demanda de vivienda en las zonas periféricas la urbe, y la precaria economía ha permitido que el problema de la informalidad en la ciudad se acrecienta de manera significativa, convirtiéndola en una “zona de riesgo” (término adoptado por parte de las autoridades del cabildo), en la actualidad al menos el 60% de la construcción residencial en el DMQ es informal (Silva, 2017).

La información de censos nacionales de vivienda es incompleta; a pesar de que las encuestas realizadas para recopilar la información son rigurosas, extensas en cobertura y suficientemente detalladas en términos de datos incluidos, estas encuestas normalmente se realizan cada 10 años, lo que hace que dichos datos sean incapaces de reflejar la variabilidad de las prácticas constructivas de las ciudades en constante crecimiento (González, 2017).

Micro

Algunos barrios de la ciudad de Quito entre ellos el Barrio San Enrique de Velasco, están ubicados en zonas inundables o demasiado secas, en pendientes irregulares, a la par de taludes inestables desprovistos de vegetación además de territorios vulnerables a deslizamientos (Gómez & Cuvi, 2016).

El Barrio San Enrique de Velasco cuenta con varias construcciones informales en la que se visualiza una mala calidad urbana, construcciones construidas sobre límites de la quebrada además de una estructuración deficiente y ciertas construcciones con mala calidad de los materiales motivo por el cual es de importancia para el presente estudio.

La construcción informal emplea materiales fuera de la norma como bloques de concreto de baja calidad o materiales de desecho, configuraciones no apropiadas como paños de mampostería de longitud y altura no permitida, aberturas excesivas, y sistemas constructivos vulnerables a los sismos como muros sin refuerzo, muros sin confinamiento, pisos blandos. El sector de estudio presenta algunas viviendas formales e informales, donde incrementan el número de pisos de forma no fiscalizada, ya que las dejan previstas para el incremento modular en altura, debido a este dinamismo

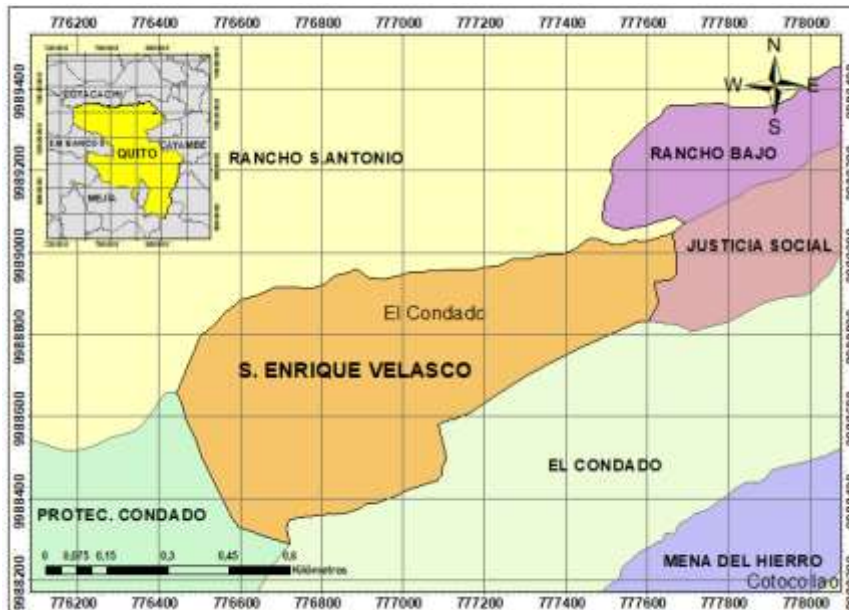
constructivo se dificulta la clasificación apropiada de la tipología y vulnerabilidad estructural en una gran cantidad de edificaciones destinadas al uso residencial y comercial (Gómez & Cuvi, 2016).

Área de Estudio

El proyecto de investigación se desarrolla en el Barrio San Enrique de Velasco parroquia El Condado perteneciente al DMQ de la provincia de Pichincha-Ecuador. Posee un área total de estudio límite geográfico de 66.73 Ha. Entre los siguientes límites. Al Norte: Con el Barrio Rancho San Antonio y Rancho Bajo. Al Sur: Con el barrio Mena del Hierro, al Este con el Barrio Rancho Bajo y Justicia Social y al Oeste: con el Barrio Protector Condado.

Figura 1

Mapa de ubicación del Barrio San Enrique de Velasco



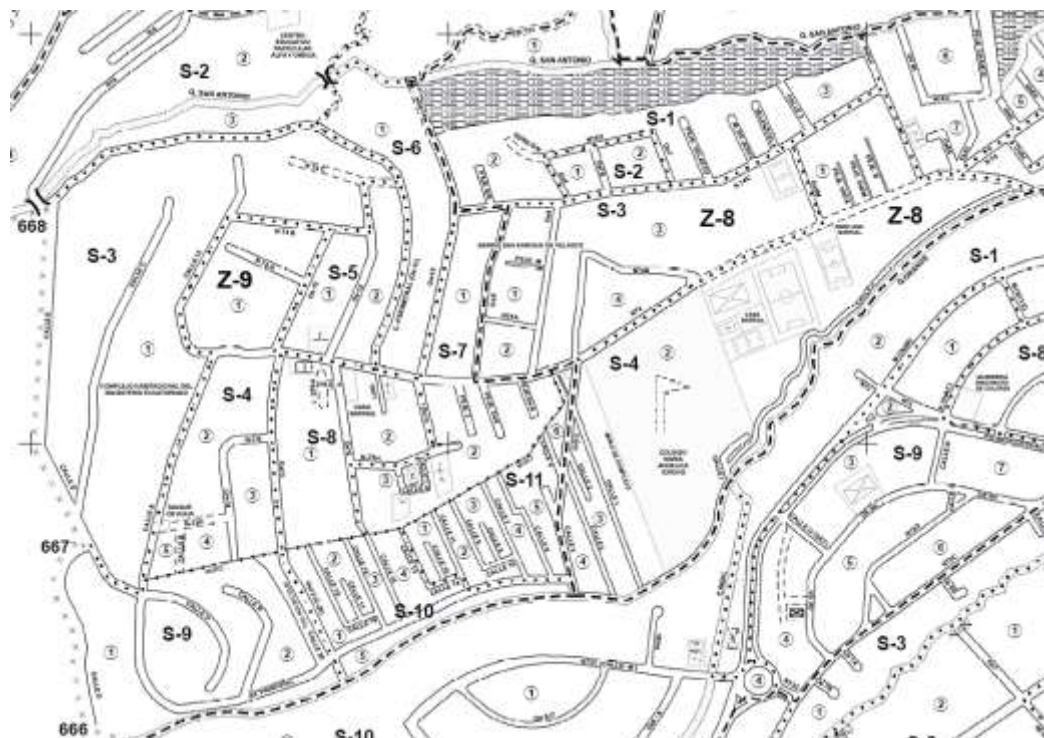
Nota: La figura indica el mapa de ubicación del sector de estudio y las parroquias con los que limita, por Elaboración propia.

Población Barrio San Enrique de Velasco

Para obtener los datos de población del Barrio San Enrique de Velasco, se recurre, a los datos del Censo de Población y Vivienda del 2010, proporcionados por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC). El dato de la cantidad de habitantes se muestra por sectores y zonas censales, en el caso del Barrio San Enrique de Velasco las zonas censales establecidas corresponden a la zona 8 y 9, como se muestra en el esquema de la siguiente figura:

Figura 2

Mapa de sectores y zonas censales Barrio San Enrique de Velasco



Nota. Tomado de Censo de Población y Vivienda (CPV) 2010, por Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC, 2020).

La población se muestra por sectores y zonas en la siguiente tabla, la cantidad de habitantes o población total resulta de la suma de todos los sectores, dando un total de habitantes del barrio de 4884, dato que servirá para los modelos de exposición.

Tabla 1

Población por sexo de la Parroquia San Enrique de Velasco

| Código | Nombre de provincia | Nombre de cantón | Nombre de parroquia | Código de zona | Código de sector | Población por Sexo | | |
|--------------|---------------------|------------------|---------------------|----------------|------------------|--------------------|-------|-------|
| | | | | | | Hombre | Mujer | Total |
| 170150008001 | PICHINCHA | QUITO | EL CONDADO | 8 | 1 | 210 | 193 | 403 |
| 170150008002 | PICHINCHA | QUITO | EL CONDADO | 8 | 2 | 114 | 110 | 224 |
| 170150008003 | PICHINCHA | QUITO | EL CONDADO | 8 | 3 | 274 | 264 | 538 |
| 170150008004 | PICHINCHA | QUITO | EL CONDADO | 8 | 4 | 127 | 118 | 245 |
| 170150008005 | PICHINCHA | QUITO | EL CONDADO | 8 | 5 | 186 | 174 | 360 |
| 170150008008 | PICHINCHA | QUITO | EL CONDADO | 8 | 8 | 134 | 185 | 319 |
| 170150009001 | PICHINCHA | QUITO | EL CONDADO | 9 | 1 | 173 | 179 | 352 |
| 170150009002 | PICHINCHA | QUITO | EL CONDADO | 9 | 2 | 197 | 191 | 388 |
| 170150009003 | PICHINCHA | QUITO | EL CONDADO | 9 | 3 | 60 | 56 | 116 |
| 170150009004 | PICHINCHA | QUITO | EL CONDADO | 9 | 4 | 189 | 183 | 372 |
| 170150009005 | PICHINCHA | QUITO | EL CONDADO | 9 | 5 | 216 | 214 | 430 |
| 170150009006 | PICHINCHA | QUITO | EL CONDADO | 9 | 6 | 126 | 123 | 249 |
| 170150009007 | PICHINCHA | QUITO | EL CONDADO | 9 | 7 | 198 | 236 | 434 |
| 170150009008 | PICHINCHA | QUITO | EL CONDADO | 9 | 8 | 228 | 218 | 446 |
| 170150009009 | PICHINCHA | QUITO | EL CONDADO | 9 | 9 | 7 | 1 | 8 |

Nota. Obtenida de Censo de Población y Vivienda (CPV) 2010, por Instituto de Estadísticas y Censos (INEC, 2020).

Desarrollo Urbano y Uso del Suelo

A partir del año de 1942, se desarrollan reglamentos de zonificación por parte de las administraciones de turno, en las mismas que mediante ordenanzas definen usos específicos para el suelo, retiros, dimensiones y altura de edificaciones permitida. Además, se define una guía para el uso del suelo en los diferentes barrios los que son para usos: residencial, industrial, comercial, área verde y usos mixtos (Chicaiza, 2017).

Conforme a lo dispuesto por el Municipio de Quito, el desarrollo urbano se basa en tres aspectos principales: funcionalidad, reglamentos y morfología. En la funcionalidad vigila aspectos como el crecimiento expansivo de la ciudad, conformación

de una centralidad indefinida, localización de equipamientos como universidades, hospitales, centro de gobierno, terminales. Mientras que los aspectos de reglamentos y morfología consideran la consolidación de recursos patrimoniales, la asignación de uso por zonas y la dinámica inmobiliaria que ha generado renovación urbana.

Tomando en cuenta los aspectos mencionados anteriormente el municipio crea el Plan de Uso y Ocupación del Suelo (PUOS) que plantea la forma de ocupación del suelo, fraccionamiento y altura de las edificaciones del Distrito Metropolitano de Quito. El PUOS establece los siguientes tipos de uso del suelo: Residencial 1, 2 y 3; Múltiple, Industrial 1, 2, 3 y 4; Equipamiento: Agrícola, Agrícola Residencial; Protección Ecológica; Preservación Patrimonial y Aprovechamiento de Recursos Naturales (Chicaiza, 2017).

Para los modelos de exposición más probables del Barrio San Enrique de Velasco se usan las edificaciones correspondientes a uso residencial y mixto, y se excluye del modelo estructuras de uso esencial como escuelas u hospitales, debido a que la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC), indica el incremento de la intensidad sísmica para el diseño de estas estructuras, por lo que se deduce que su capacidad para soportar un sismo es mayor a las estructuras de uso residencial o mixto.

El uso residencial se asigna a suelos donde existe únicamente estructuras con viviendas, que de acuerdo al PUOS se clasifican en las siguientes categorías: Residencial 1, Residencial 2, Residencial 3, de baja, mediana y alta densidad correspondientemente. Mientras que para el uso múltiple puede haber una combinación de uso residencial, comercial e industrial de bajo y mediano impacto. Se muestra en la tabla siguiente los usos de suelo especificados anteriormente:

Tabla 2*Uso residencial y múltiple*

| USO | SIMB | ESTABLECIMIENTOS |
|--------------------|-------------|---|
| <i>Residencial</i> | <i>R1</i> | Se permite la presencia limitada de actividades económicas y equipamientos de nivel barrial y sectorial |
| | <i>R2</i> | Se permite actividades económicas de nivel barrial, sectorial y equipamientos barriales, sectoriales y zonales. |
| | <i>R3</i> | Se permite actividades económicas y equipamientos de nivel barrial, sectorial y zonal. |
| <i>Múltiple</i> | <i>M</i> | Corresponde al uso asignado a los predios con frente a ejes o ubicados en áreas de centralidad que pueden coexistir residencia, comercio, industrias de bajo impacto. |

Nota. Tomado de *Código Municipal para el Distrito Metropolitano de Quito Tomo I*, por (Consejo Metropolitano de Quito, 2020)

Nivel socioeconómico

Para describir el nivel socioeconómico del Barrio San Enrique de Velasco, se recurre a índices difusos que están en función de los gastos de una familia, en el estudio y cálculo de índices difusos realizados por Salvador et al., (2014) se definen 6 niveles socioeconómicos o clases sociales como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 3*Clases Sociales en función de índices difusos.*

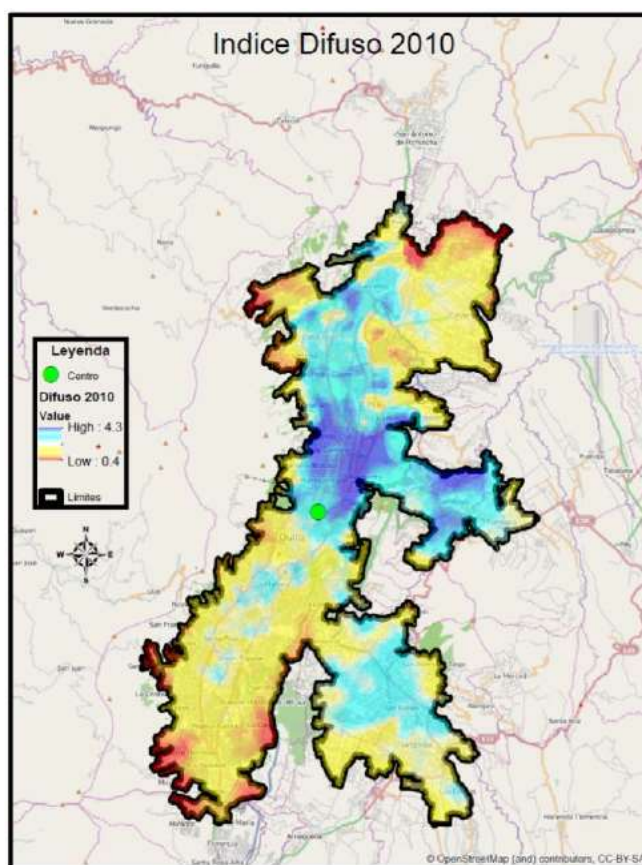
| Índice Difuso | Aproximación | Clase Social |
|----------------------|---------------------|---------------------|
| 0-0.5 | 0 | Indigente |
| 0.501-1.5 | 1 | Pobre |
| 1.501-2.5 | 2 | Clase Media Baja |
| 2.501-3.5 | 3 | Clase Media Típica |
| 3.501-4.5 | 4 | Clase Media Alta |
| 4.501-5 | 5 | Clase Alta |

Nota. En la tabla se indica las clases sociales de acuerdo a la aproximación de los índices difusos. Tomado de *Un índice difuso de niveles socioeconómicos en Quito*, por Salvador et al., 2014.

Las clases sociales anteriormente mencionadas se distribuyen geográficamente en la ciudad de Quito como se muestra en la siguiente figura, tomando en cuenta que a medida que el índice difuso sea más bajo, los colores son más amarillos y rojos representando a las clases sociales más pobres y a la indigencia, y mientras el índice difuso sea mayor los colores son más celestes y azul oscuro, representando a las clases sociales altas.

Figura 3

Mapa de índices difusos año 2010



Nota: La figura indica el índice difuso 2010 en la ciudad de Quito Tomado de *Un índice difuso de niveles socioeconómicos en Quito*, por Salvador et al., 2014.

En el mapa de índices difusos se puede apreciar como las clases más pobres se ubican en las zonas periféricas de la ciudad, mientras que las clases sociales altas, o clase media alta se ubican en la parte norte, centro de la ciudad con extensión a los Valles de Tumbaco, en el caso del Barrio San Enrique de Velasco, el mismo se ubica en la Parroquia del Condado que se compone de algunos barrios y urbanizaciones, en ésta parroquia la única zona con un índice difuso que indica una clase social alta se ubica en la Urbanización el Condado, en el caso del Barrio San Enrique de Velasco, las clases sociales que residen en el barrio de acuerdo a la interpretación de los índices difusos, son la clase social media baja y la clase social media típica.

Justificación e importancia

Debido a la alta demanda de construcciones informales en la ciudad de Quito el cual no se rigen a normas sismo resistentes presentando un alto riesgo para la población, enfocándose el riesgo en 4 factores importantes: estructuración deficiente, mala calidad en los materiales de construcción, falta de supervisión técnica en la construcción de las edificaciones y la zona del asentamiento de la edificación (Silva, 2017).

Para lo cual es necesario el estudio de riesgo sísmico en el Barrio San Enrique de Velasco permitiendo analizar las zonas donde existen amenazas y las pérdidas económicas o humanas que generaría tras un movimiento telúrico, sirviendo como información base para entidades gubernamentales para futuros planes de contingencia o propuestas de reforzamiento.

La Escuela Politécnica Nacional del Ecuador (EPN) y el Municipio de Quito colaboraron con GEM en el desarrollo de datos de exposición para Quito, y dentro del

marco de acción del proyecto TREQ por sus siglas en inglés (Training and Communication on Earthquake Risk Assessment) el cual se enfoca en amenazas y riesgos, lo que se requiere de modelos de exposición a escala urbana que puedan formar parte del material de capacitación para los actores de la ciudad. Estos deben contar con información actualizada sobre el número de edificios y sus ocupantes en escala urbana, clasificados según su vulnerabilidad estructural y costo de reemplazo.

La plataforma OpenQuake permite explorar conjuntos de datos como la exposición, los identificadores, como la vulnerabilidad social, así como los mapas relacionados con la amenaza y el riesgo de terremoto para comprender los factores de peligro y riesgo en el área de estudio, parámetros de los cuales se van a desarrollar en este proyecto de investigación para lo cual es de importancia el uso de esta herramienta permitiendo evaluar así el riesgo sísmico (Silva, 2017).

Objetivos Generales y Específicos

Objetivo General

Realizar un estudio de riesgo sísmico para el Barrio San Enrique de Velasco de la ciudad de Quito a partir de una base de datos catastrales e información censal disponible, que sirvan a entidades gubernamentales para futuros planes de contingencia ante un evento sísmico potencialmente destructivo.

Objetivos Específicos

- Recabar información sobre estudios de amenaza sísmica para el sector seleccionado en base a catálogos sísmicos.

- Recopilar datos censales de población y vivienda del sector de estudio, además de la información cartográfica disponible.
- Identificar las tipologías estructurales del sector de estudio, a través de catastros disponibles compaginando con un levantamiento de información remota.
- Desarrollar modelos de exposición en base a la cuantificación de los elementos expuestos para determinar costos de reposición.
- Realizar estudios de vulnerabilidad para definir curvas de fragilidad que permitan asociar el estado de daño con pérdidas económicas.
- Integrar parámetros de amenaza, exposición y vulnerabilidad para calcular el riesgo sísmico mediante un software de acceso libre desarrollado por el GEM.

Capítulo II

Marco Teórico y Datos Censales

Evaluación del Riesgo Sísmico - Proyecto SARA

Debido a los eventos naturales desastrosos como lo es un terremoto, y la baja capacidad de una respuesta de recuperación por parte de la población entre el año 2013 y 2015, Global Earthquake Model (GEM), desarrolla como iniciativa regional el proyecto de evaluación del riesgo para Sudamérica SARA por a sus siglas en inglés que tiene la finalidad de medir el riesgo y la amenaza y estimar los factores socioeconómicos que se producen por los daños físicos ocasionados por estos eventos (Chicaiza, 2017).

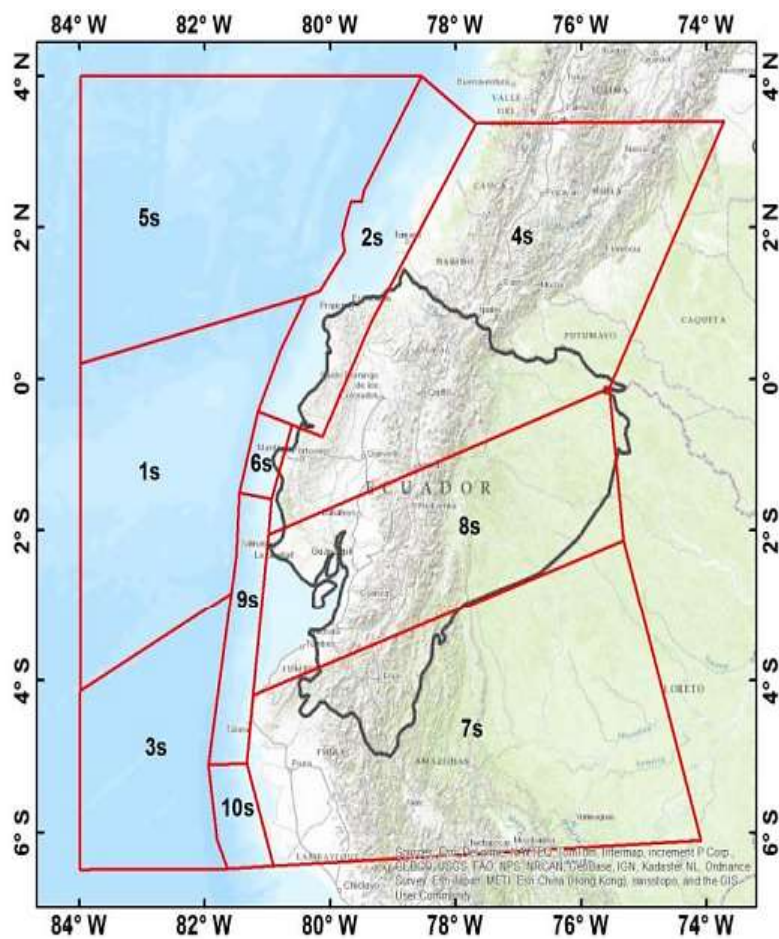
Los países seleccionados de Sudamérica más propensos a eventos telúricos son: Colombia, Venezuela, Chile, Ecuador y Perú, en los que el proyecto SARA enfoca cinco módulos: exposición, peligro, vulnerabilidad física, vulnerabilidad socioeconómica y resiliencia con la estimación de pérdidas y escenarios de la ciudad (Chicaiza, 2017).

Zona sísmica en el Ecuador

Las principales fuentes sísmicas que están regidas en el Ecuador son subducción (interplaca e intraplaca), y de tipo corticales (superficiales), en el caso de la ciudad de Quito la desagregación de la amenaza indica que los sismos de mayor intensidad provienen de las fallas cortical estas tienen una profundidad <40 Km que ocurren dentro de la placa Sudamericana, a continuación se puede visualizar las figuras 4 y 5 correspondiente al tipo de fuentes sísmicas mencionadas anteriormente (Quinde & Reinoso, 2016).

Figura 4

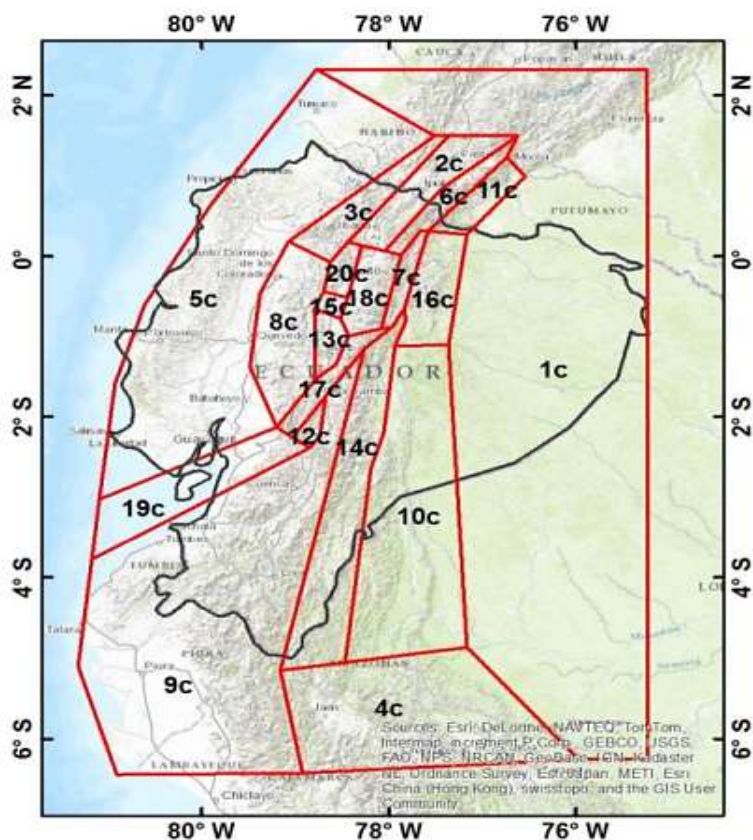
Fuentes sísmicas de tipo subducción



Nota. Tomado de Estudio de peligro sísmico de Ecuador y propuesta de espectros de diseño para la ciudad de Cuenca (p.4), por Quinde & Reinoso, 2016.

Figura 5

Fuentes sísmicas tipo corticales



Nota. Tomado de *Estudio de peligro sísmico de Ecuador y propuesta de espectros de diseño para la ciudad de Cuenca* (p.4), por Quinde & Reinoso, 2016.

Es necesario analizar la información tectónica disponible, con la finalidad de identificar las fallas capaces de generar el sismo de control y de destacar trabajos como Beauval et al. (2014) que analizó que las fuentes sísmicas influyentes en Quito son controladas por la actividad en el régimen tectónico cortical.

Amenaza sísmica en Quito

Debido a los procesos de erupciones volcánicas, principalmente del complejo montañoso Pichincha, el suelo de la ciudad de Quito es denominado “cangahua”,

adicional tiene depósitos arcillo-arenosos con altos niveles freáticos, este tipo de suelo es muy resistente y apto para la construcción (Freddy Cañizares, 2017).

Los movimientos telúricos causados en epicentros de diferentes zonas de la ciudad han ocasionado daños y destrucción provocando que habitantes desalojen sus hogares y se refugien en albergues temporales, esto nos muestra los estudios de sismicidad que cada 50 años (en promedio) se han producido (Parra, 2016).

La presencia de sismos repetitivos en la historia geológica de la cuenca que levanta 400m sobre el nivel del Valle Interandino de la ciudad de Quito se debe a que es una de las ciudades con mayor amenaza sísmica del Ecuador por estar ubicada sobre el sistema de fallas de Quito, se trata de una falla longitudinal de 45 Km que atraviesa la ciudad, generando esfuerzos cortantes producidos por su desplazamiento (Freddy Cañizares, 2017).

Modelo de amenaza sísmica

Para el cálculo del riesgo sísmico se requiere de la utilización de un análisis probabilístico de la amenaza sísmica (PSHA por sus siglas en inglés), debido que es aquel que se utiliza dentro del software OpenQuake permitiendo involucrar variables que intervienen en el peligro sísmico de la zona de estudio, los cuales son: magnitud del sismo, características de la falla, probabilidad de excedencia de las intensidades sísmicas etc., los cuales son incluidos en los modelos de cálculo (ERN-CAPRA, 2005).

El desarrollo del modelo de amenaza sísmica requiere caracterizar las fuentes sismogénicas alrededor de la zona de análisis además de catálogos sísmicos que tengan la información sobre registros de movimientos telúricos según su ubicación espacial, magnitud, fecha y características de rupturas, se puede cuantificar en términos de aceleración, velocidad y desplazamiento generado en el suelo (Hinestroza, 2018).

De acuerdo a la intensidad del movimiento en el sitio de estudio se conocen los parámetros de movimiento fuerte que definen el nivel de peligro en un modelo de amenaza sísmica, su estimación se lo realiza a través de ecuaciones conocidas como funciones de atenuación dependiendo principalmente de la magnitud sísmica, distancia de la fuente sismogénica y el tipo de mecanismo focal de ruptura (ERN-CAPRA, 2005).

Uno de los principales componentes en un análisis de amenaza sísmica es el estudio de las funciones de atenuación o ecuaciones de predicción del movimiento del suelo (GMPE) por sus siglas en inglés, se utilizan para estimar el movimiento del suelo en una ubicación dada en función de la magnitud del terremoto, la distancia desde la fuente del terremoto, y otras características de la fuente, la ruta y el sitio, intentando predecir la intensidad con la que se va a sentir la agitación de un terremoto (Kaklamanos et al., 2011).

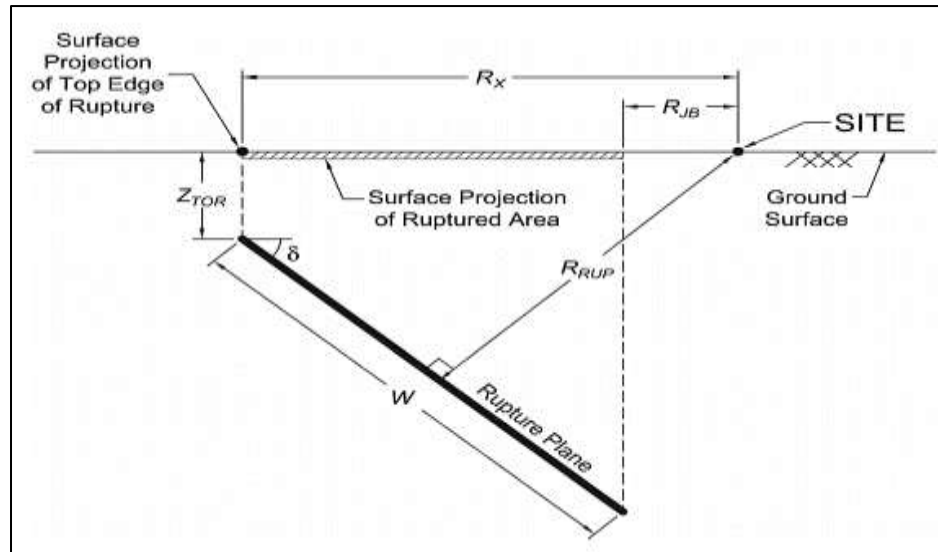
Para los campos de movimiento del terreno se necesita conocer la distancia a la que se encuentra la ruptura y las características que esta conforma, se la puede encontrar de dos formas, a continuación, se indica en la siguiente figura

- 1) La distancia del hipocentro a la ruptura

- 2) La distancia que existe entre el lugar donde se mide la intensidad y la proyección más cercana al plano de ruptura en la superficie.

Figura 6

Distancia fuente- emplazamiento



Nota. En la figura se muestra el plano de ruptura de una falla producido por un terremoto. Tomado de *Estimación de parámetros de entrada desconocidos al implementar la NGA ecuaciones de predicción del movimiento del suelo en la práctica de la ingeniería* (p.1222), por Kaklamanos et al., 2011.

Dicha notación de la figura es la siguiente:

R_{RUP} : Distancia de inclinación al punto más cercano en el plano de ruptura

R_{JB} : Distancia horizontal a la proyección de la superficie de la ruptura.

Z_{TOR} : Profundidad de ruptura hasta la parte superior

W : Ancho de ruptura por inmersión hacia abajo

δ : El buzamiento de la falla

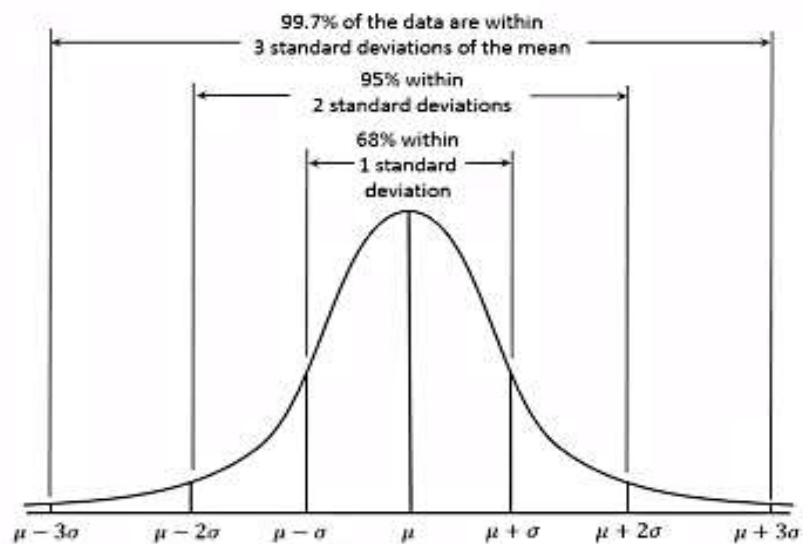
Los modelos de movimiento del terreno es una herramienta importante para el cálculo de riesgo sísmico, debido a que si se produce un terremoto se puede hacer una estimación de la intensidad que se va a sentir en el lugar de una vivienda, una escuela, un hospital; un modelador de riesgo puede transformar dicha intensidad en una métrica de daño estructural o un pérdida económica y humana.

Variabilidad de la intensidad

A la hora de hacer un cálculo de amenaza o riesgo sísmico es necesario considerar la variabilidad de la intensidad, debido a que tienen una variabilidad intrínseca y predecir exactamente la agitación del terreno no es posible debido a la complejidad del fenómeno sísmico, es por eso que para los modeladores es importante si una estación puede registrar miles de intensidades a lo largo del tiempo provocadas por miles de eventos sísmicos, un histograma de dichas intensidades sería una distribución gaussiana o normal como se muestra en la siguiente figura. Si se modela miles de intensidades la mayoría seguiría una tendencia central o estarían cerca de la media, pero al mismo tiempo encontraremos algunos que están muy por encima de la media y muy por debajo de la media con un nivel de dispersión descrito por el modelo de movimiento (Global Earthquake Model, 2020).

Figura 7

Variabilidad de la intensidad



Nota. La figura muestra un histograma de intensidades provocadas por eventos sísmicos. Tomado de *Openquake Movimiento del terreno: Marco Teórico*, por Global Earthquake Model, 2020.

Modelo de Exposición

Un modelo de exposición es el catálogo de tipologías estructurales, describe de manera detallada los elementos de uso comunitario como edificios residenciales, escuelas, hospitales, puentes entre otros, que se encuentra amenazados ante los fenómenos naturales potencialmente destructivos como huracanes, inundaciones o terremotos (Chicaiza, 2017).

Las características de las edificaciones como es el material, sistema de resistencia sísmica, número de pisos, ubicación geográfica y costo de reposición es

información requerida para la realización de inventarios producidos en el estudio del modelo de exposición (Hinestroza, 2018).

Para la generación de un modelo de exposición sísmica depende del modelo que se quiere generar, debido a que puede ser en términos de área construida o número de elementos expuestos es decir para el caso de modelo de viviendas, el uso que se le da a las edificaciones, es posible que en ciertas ocasiones la información requerida para la generación de este modelo se encuentre almacenada en oficinas gubernamentales del sector de estudio, además de sistemas de información geográfica (SIG) y algunas plataformas virtuales de uso libre (Osorio, 2015).

Elementos de un modelo de exposición

Área construida

La información geográfica, SIG permiten el procesamiento de imágenes de alta resolución, y empleando alguna metodología sencilla debido a que resulta factible identificar el área construida en planta de las edificaciones, con la ayuda de sistemas de información como Google Earth, Google Maps, entre otros., por los que cualquier imagen estará georreferenciada si se crea shapes (capas de sistemas de información geográfica) (Osorio, 2015).

Número de pisos

Con la ayuda de la plataforma Google Street View, se seleccionan las vías del sector de estudio, haciendo un recorrido virtual y realizando un levantamiento de información remota del número de pisos de las estructuras visualizadas, para lo cual se

debe calcular el porcentaje del número de pisos con respecto al total de edificaciones realizadas, además cabe recalcar que el criterio del investigador es de suma importancia para la adquisición de las distribuciones porcentuales de número de pisos. Con el número de pisos se puede clasificar a las estructuras por alturas determinadas estimadas, que es una variable relacionada con el período fundamental de vibración de una estructura, que influye de manera directa sobre el comportamiento sísmico de la misma.

Sistemas estructurales

Los tres parámetros relacionados con el sistema de resistencia de cargas laterales: material, tipo de sistema y nivel de ductilidad son aquellos que la fundación GEM clasifica a los sistemas estructurales, además de definirse por número de pisos y grupo socioeconómico. La Guía de la Agencia Federal para la Gestión de Emergencias (FEMA), destacando el FEMA P-154 (2015) que está basado en 15 tipologías estructurales más comunes permite identificar el sistema de resistencia a cargas laterales utilizado para la caracterización de las diferentes tipologías (González, 2017).

Clasificación para Tipologías Estructurales

En base a la nomenclatura de los catálogos de tipologías estructurales del “GEM Building Taxonomy” misma que es recopilada por diferentes autores está asociada a las tipologías y sistemas estructurales de una región o país para lo cual en el año 2013 se desarrolló una metodología para la clasificación de las edificaciones de acuerdo a sus atributos estructurales (Brzev et al., 2013).

Para caracterizar las tipologías constructivas se toman en cuenta tres parámetros principales:

- Material
- Sistema de resistencia lateral
- Ductilidad

Además, también se toma en cuenta el número de pisos o niveles presentes en la edificación. De tal manera se cita uno de los ejemplos obtenidos al clasificar los datos de levantamiento y datos catastrales para una estructura tipo “CR+CIP/LFLSINF/DNO/HEX:2”, el código indica que la edificación es de concreto elaborado en sitio con sistema de resistencia lateral de relleno con paredes de mampostería con losa plana alivianada o maciza no dúctil o sin muestras de ingeniería con una altura de 2 pisos.

Los dos parámetros principales para codificar una tipología son el material predominante con su tecnología constructiva y su sistema de resistencia lateral, para cada material se utiliza una nomenclatura diferente la misma que ha sido desarrollada por Brzev et al., (2013) y se muestra en la siguiente tabla los materiales con sus respectivas tecnologías constructivas encontradas en la zona de estudio:

Tabla 4

Tipologías de acuerdo a su material y tecnología de construcción.

| Materiales y tecnología de construcción | |
|---|---------------------|
| Lista de material GEM | Nomenclatura |
| Concreto (Elaborado en sitio) | CR+CIP |
| Mampostería confinada (Bloque de concreto) | MCF+CBH |
| Mampostería Reforzada | MR |
| Mampostería no reforzada (Bloque de concreto) | MUR+CBH |
| Mampostería no reforzada (Ladrillo sólido de arcilla) | MUR+CLBRS |
| Mampostería no reforzada de Adobe | MUR+ADO |
| Madera - (Wood) | W |
| Acero - (Steel) | S+S99 |
| Tierra - (Earth) | E |
| Desconocido | UNK |

Nota. Elaboración Propia

El segundo parámetro más importante para definir una tipología estructural es el sistema de resistencia lateral, mismo que es consecuente con el tipo de material predominante de cada tipología estructural, los sistemas de resistencia lateral se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 5

Sistemas de Resistencia Lateral

| Sistema de resistencia lateral | |
|---|---------------------|
| Lista GEM | Nomenclatura |
| Sistema Resistente de Muros | LWAL |
| Sistema de Pórticos sin Mampostería de Relleno | LFM |
| Sistema de pórticos rellenos con paredes de mampostería | LFINF |
| Sistema dual de pórticos y muros de corte | LDUAL |
| Sistema Resistente ante cargas Laterales desconocido | L99 |
| Sistema sin paredes con losa plana alivianada o maciza | LFLS |
| Sistema relleno con paredes de mampostería con losa plana alivianada o maciza | LFLSINF |

Nota. Elaboración Propia

A continuación, se detallan las tipologías estructurales más representativas del sector de estudio de acuerdo a la caracterización de su material con tecnología constructiva y su sistema de resistencia lateral.

Tipologías de Concreto (CR+CIP)

El código CR+CIP caracteriza a las estructuras por un sistema estructural compuesto de concreto elaborado o vaciado en sitio, el mismo que conforma un sistema de columnas, vigas, losas, muros y otros elementos estructurales que son parte de un sistema de resistencia lateral, dentro de los elementos de concreto en la zona, predominan dos sistemas de resistencia lateral: el primero corresponde a los sistemas de pórticos rellenos con paredes de mampostería cuya codificación es LFINF, mismos cuya composición se da con pórticos conformados por columnas y vigas reforzadas y su relleno está conformado por mampostería de bloque o ladrillo adosado al pórtico de concreto.

Figura 8

Fotografía de una edificación de concreto reforzado vaciado in situ, con un sistema de resistencia lateral compuesto por pórticos rellenos de mampostería de bloque adosada al pórtico.



Nota: Fotografía propia obtenida con dron profesional en vuelo modo deportivo.

Y el segundo es un sistema relleno con paredes de mampostería con losa plana alivianada o maciza (LFSINF), cuya diferencia con el primer sistema radica en que la composición se da con vigas banda y un comportamiento menos dúctil, por lo general a este sistema se lo clasifica como no dúctil, y es sistema de resistencia lateral con mayor presencia en la zona de estudio como en toda la urbe capitalina. En la figura 9 se muestra una de las fotografías obtenidas con ayuda del Street View de Google.

Figura 9

Edificación con sistema de resistencia lateral relleno en mampostería de bloque con losa plana alivianada.



Nota: Imagen Obtenida de (Google Street View Map, 2020)

Tipologías de Acero (STEEL-S+S99)

Con el código Steel o S+S99 se caracteriza a las estructuras cuyos elementos estructurales principales predomina el acero, es importante recalcar este tipo de material en las tipologías a estudiarse, sin embargo, en el sector de estudio las tipologías de acero son menores al 0,2%, pero es necesario considerarla dentro del estudio para que no exista errores al momento de la clasificación de las tipologías, a continuación, se puede visualizar en la figura 10.

Figura 10

Estructura mixta con elementos de acero y mampostería de bloque



Nota: Imagen Obtenida de (Google Street View Map, 2020).

Tipologías de Mampostería**Mampostería confinada (MCF+CBH)**

Esta tipología también llamada mampostería de muros confinados se caracteriza por la construcción de piezas de mampostería en bloque o ladrillo enlazadas por medio de un mortero, previo al vaciado del hormigón de relleno que confina la mampostería, que son los elementos que dan rigidez y soporte NEC, (2015) Por lo general esta tipología se observa en edificaciones de un solo piso, cuyo techo es de asbesto cemento o zinc, una de las diferencias con la mampostería no reforzada a tener en cuenta es la falta de elementos confinantes que en este caso es el concreto u hormigón reforzado de las columnas. El sistema de resistencia lateral característico de esta tipología es el de muros de mampostería, cuya codificación es LWAL. En la siguiente

figura se muestra una de las edificaciones del sector características de esta tipología estructural.

Figura 11

Vivienda en Mampostería confinada



Nota: Imagen Obtenida de (Google Street View Map, 2020).

Mampostería Reforzada (MR)

La mampostería reforzada se caracteriza por la conformación de piezas con perforación vertical, adheridas unas sobre otras con la utilización de mortero, y se refuerzan verticalmente con alambres o barras de acero (NEC, 2015).

Generalmente también suelen confinarse con hormigón reforzado en columnas, esta tipología no se encuentra en el sector de estudio, los procedimientos constructivos suelen ser un poco más complejo y deben estar sujetos a la observación de personal calificado.

Mampostería no reforzada (MUR + CBH/+CLBRS)

La mampostería no reforzada solo se compone de piezas unidas por mortero, sin cumplir cuantías mínimas de refuerzo vertical o transversal como en una mampostería con refuerzos parciales, también denominada como mampostería simple (NEC, 2015).

A diferencia de la mampostería confinada, este sistema no posee elementos confinantes como columnas de hormigón armado, generalmente se apoyan sobre vigas de amarre, y al igual que la mampostería confinada, el techo o cubierta es de zinc o asbesto cemento.

La codificación utilizada para esta tipología es MUR, con el sufijo +CBH para mampostería de bloque de concreto y +CLBRS para mampostería de ladrillo sólido en arcilla. En la imagen 5 se observa una tipología MUR+CBH, se puede observar que no posee reforzamiento ni está confinada, este tipo de estructura es categorizada como no dúctil, son estructuras frágiles que no tienen buen comportamiento ante un sismo.

Figura 12

Tipología de Mampostería No reforzada de Bloque de Concreto



Nota: Obtenida de (Google Street View Map, 2020).

Tipología de Mampostería de Adobe (MUR+ADO)

Las tipologías de adobe, son otro tipo de sistema de mampostería en este caso con bloques de adobe, también pueden incluirse dentro de este sistema estructuras de adobe tapial, generalmente son estructuras no dúctiles, no reforzadas o con reforzamiento desconocido, el porcentaje de estas estructuras en el sector de estudio es

mínimo. Se muestra en la siguiente figura una estructura en mampostería de Adobe. Su codificación de acuerdo a su material y tecnología es MUR+ADO, y los sistemas de resistencia lateral a utilizar para la clasificación de esta tipología son del tipo muro mampostería LWAL.

Figura 13

Tipología en estructura de mampostería de Adobe, no reforzado.



Nota: Obtenida de (Google Street View Map, 2020).

Vulnerabilidad

La vulnerabilidad en edificaciones se define como el grado de incapacidad de una estructura para afrontar un evento sísmico probable, o también como la predisposición de una estructura a sufrir daños ante la presencia de un sismo (Chicaiza, 2017).

Es muy importante la definición de la vulnerabilidad ya que con la misma se define una escala, tomando como ejemplo que la intensidad de un sismo que se requiere para colapsar una estructura de mampostería o muros de tierra no es la misma que se requiere para destruir una estructura de hormigón armado u otro sistema estructural (Chicaiza, 2017).

La vulnerabilidad también se define de acuerdo a Barbat & Pujades, (2004) como: “ El grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos bajo riesgo, resultado de la probable ocurrencia de un evento desastroso, expresada en una escala que va de 0, o sin daño, a 1, o pérdida total.”

En este contexto la vulnerabilidad sísmica a priori puede cuantificarse como alta cuando las construcciones se realizan sin la inspección de profesionales y sin los debidos permisos, ya que por lo general se puede incurrir en la utilización de materiales inapropiados y técnicas constructivas poco convencionales que incurrirán en un comportamiento incierto con alta probabilidad de un daño considerable en una edificación o un sector determinado al presentarse un evento sísmico.

Modelo de consecuencias

Los modelos de consecuencias convierten estados de daños a estados de pérdidas económicas, estos modelos generalmente proceden de la opinión u observación de expertos al realizar un análisis del estado de daño en las estructuras afectadas por un evento sísmico dado, que luego se relacionan con los costos de reposición de las edificaciones afectadas (Hinestroza, 2018).

Diferentes autores han creado modelos de consecuencias basándose en criterios de observación técnicos, aquí se puede resaltar el modelo realizado por Durukal et al., (2006) el mismo que se basa en el criterio de especialistas en el mercado de seguros, estimando niveles de daño en base a la Escala Macrosísmica Europea (EMS) y costos de reposición para un estado de daño asignado. El modelo considera los siguientes grados en cuanto a pérdidas:

- Grado 1: 10 % de pérdidas.

- Grado 2: 20% de pérdidas.
- Grado 3: 40% de pérdidas
- Grado 4: 90% de pérdidas
- Grado 5: 100% de pérdidas

Riesgo Sísmico

El riesgo a menudo representa la probabilidad de que un evento determinado ocurra y el daño o impacto que la misma causa. De acuerdo a Calvi et al., (2006) el riesgo sísmico se idealiza como un modelo que considera pérdidas económicas o humanas asociando tres elementos principales: amenaza sísmica, exposición y vulnerabilidad. Componentes que se abordan en este capítulo y en el desarrollo del presente proyecto investigativo.

En consideración de la probabilidad de ocurrencia de un sismo destructivo y el efecto destructivo causado en terremotos pasados, el Municipio del Distrito Metropolitano de Quito pone en marcha un proyecto para el manejo del riesgo debido a terremotos, el mismo simuló y presentó escenarios de riesgo sísmico con un terremoto cortical teórico utilizando relaciones de atenuación fundamentados en terremotos pasados y tomando en cuenta las zonas más pobladas de la época (Parra, 2016).

Cálculo de Riesgo Sísmico

Para el cálculo del riesgo sísmico se integran 3 parámetros principales: vulnerabilidad, exposición y amenaza. Para esto se utilizó el software de código abierto OpenQuake, cuyo desarrollo es llevado a cabo por el GEM, mismo que está basado en el estado del arte en riesgo sísmico GEM, (2015). Se exponen ciertos aspectos más relevantes del programa:

Integración del Modelo de Amenaza Sísmica

Con el modelo de amenaza sísmica el software OpenQuake permite realizar análisis de eventos estocásticos calculando parámetros de interpretación como la pérdida promedio anual, tasa de excedencia de pérdidas, a la vez que posibilita la selección de escenarios sísmicos en un lugar determinado como es el caso en el Barrio San Enrique de Velasco.

Integración del Modelo de exposición

El modelo de exposición a integrar en el software, debe poseer parámetros mínimos necesarios como: coordenadas del centroide del sector de análisis, tipologías estructurales encontradas y clasificadas, cantidad de edificaciones por tipología y sus costos de reposición. El sector de análisis determinado por una forma poligonal de acuerdo a su nivel de especificación puede estar conformado desde un elemento como una edificación, o grupos de elementos, predios, manzanas, barrios, parroquias o ciudades (Hinestroza, 2018).

Efectos de sitio

Los efectos de sitio se integran a OpenQuake fundamentados en la velocidad de onda de corte para los últimos 30 metros (V_{s30}) pertenecientes a un polígono de centroide específico.

Integración de Fragilidad

El software dispone de una base de datos extensa en cuanto a curvas de fragilidad, las curvas de fragilidad se asignan a las diferentes tipologías estructurales, además también se permite aplicar curvas desarrolladas por el usuario.

Integración de Vulnerabilidad

En esta parte a través del modelo de consecuencias se permite el paso de estado de daño a pérdidas económicas.

Análisis de escenarios sísmicos

Permite identificar como se distribuyen geográficamente los daños asociados a las edificaciones que se presentan en un evento determinado. Los escenarios sísmicos vienen en función de la profundidad focal, epicentro, geometría de la ruptura y magnitud. En base al análisis de los escenarios resultantes, los municipios o administraciones zonales puede preparar planes de contingencia para mitigar posibles desastres, y dar atención a las zonas más vulnerables (Hinestroza, 2018).

Capítulo III

Amenaza Sísmica

Es posible identificar dos metodologías primordiales de evaluación de amenaza, el análisis determinístico y probabilístico, es importante saber que la evaluación probabilística de la amenaza sísmica (PSHA) es la metodología principal para evaluar el peligro potencial que plantean los terremotos, además es aquella que maneja el software OpenQuake el cual será de utilización para el desarrollo de amenaza sísmica de este proyecto.

Según ERN-CAPRA, (2005) para conformar un análisis probabilístico de amenaza sísmica los pasos que se llevan a cabo son los siguientes:

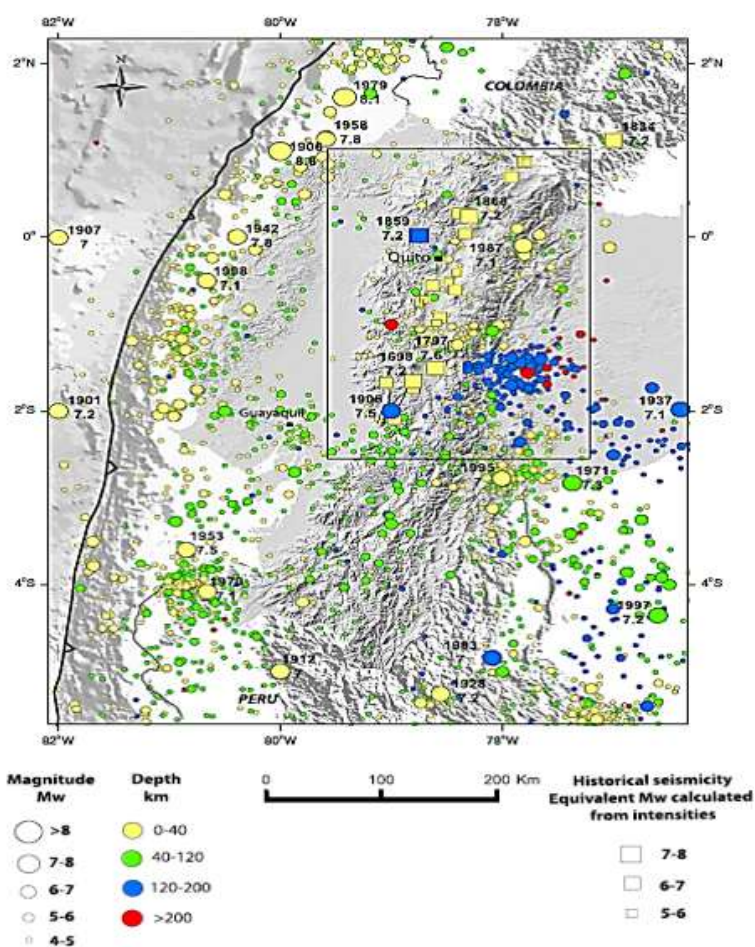
1. Determinación de los catálogos sísmicos del sitio de análisis, y la caracterización de las fuentes generadoras de terremotos en términos de su geometría y distribución de puntos de inicio de la ruptura. La sismicidad se establece por medio de una curva de recurrencia de las magnitudes ocasionadas en cada fuente específica indicando su nivel de excedencia.
2. Selección de las funciones de atenuación que permitan caracterizar completamente la amenaza en el sector de estudio, requiriendo funciones de atenuación de velocidad, desplazamiento, aceleración, duración etc.
3. Se combinan las incertidumbres relacionadas a localización, tamaño y atenuación indicando la probabilidad que una intensidad sea igualada o excedida en un período de tiempo determinado.

Catálogos sísmicos del sitio de análisis

Según Beauval et al., (2013), en la siguiente figura se puede observar epicentros del catálogo de terremotos unificados de 1587-2009, que integran terremotos instrumentales e históricos, con magnitudes de 4 y superiores.

Figura 14

Catálogo de terremotos unificado

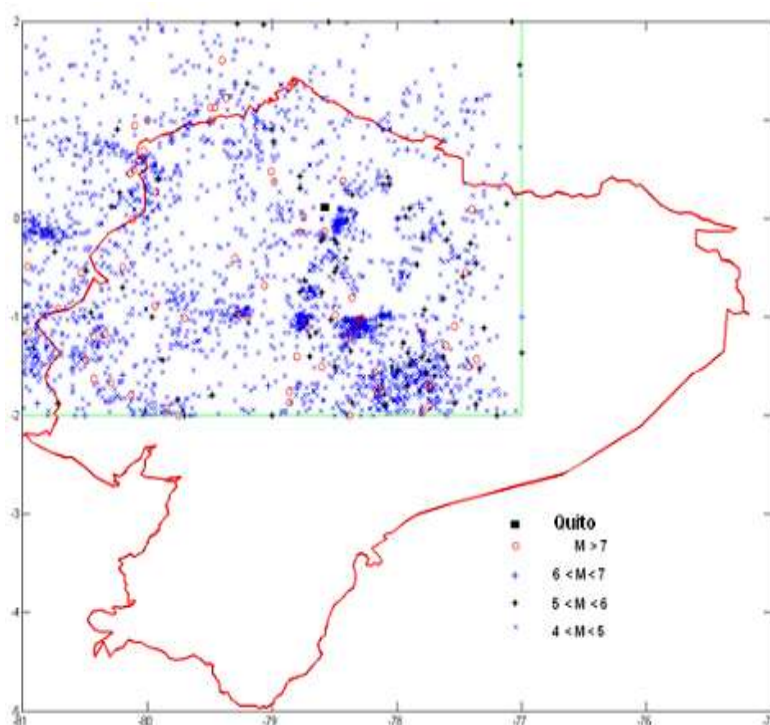


Nota. Tomado de *Catálogo de terremotos para la evaluación de peligros sísmicos en el Ecuador*. por Beauval et al., 2013.

Por otro lado, dentro de la investigación de Aguiar & Chunga (2013), presentan los sismos registrados desde 1900 hasta el 2012 entre las latitudes 2 N y 2 S y entre longitudes 77W a 81 W, y con profundidades menores a 60km, y los sismos con una magnitud superior a 7 marcados con un círculo rojo; mostrando la gran peligrosidad sísmica que existe en la ciudad de Quito.

Figura 15

Sismos registrados 1900-2012



Nota. Tomado de *Microzonación sísmica del Centro Norte de Quito. Segunda Jornada de Investigación científica desde las Aulas (2013)* (p.18), por Aguiar & Chunga, 2013.

Adicional se recopiló los catálogos sísmicos del IGEPN, desde el año 2014 al 2019 donde indica los movimientos telúricos de la siguiente manera:

Tabla 6*Catálogos sísmicos en la ciudad de Quito*

| Número | Origen del evento | Fecha | Latitud | Longitud | Profundidad | Magnitud Principal (Mw) | Este | Norte |
|--------|-------------------|------------------|----------|-----------|-------------|-------------------------|------------|------------|
| 1 | igeprn 2011 | 29/10/2011 13:50 | -0.13282 | -78.39620 | 5.53 | 3.99 | 789837.195 | 9985303.7 |
| 2 | igeprn2014pzxe | 16/8/2014 15:08 | -0.04806 | -78.41894 | 5.44374 | 4.57098 | 787305.358 | 9994682.6 |
| 3 | igeprn2014qabt | 16/8/2014 17:27 | -0.04878 | -78.41943 | 6.03873 | 3.78757 | 787250.966 | 9994603.2 |
| 4 | igeprn2014qbjv | 17/8/2014 16:30 | -0.05677 | -78.40621 | 5.39597 | 3.93731 | 788722.839 | 9993718.67 |
| 5 | igeprn2014psys | 12/8/2014 19:57 | -0.05075 | -78.41844 | 6.08283 | 5.09717 | 787360.585 | 9994385.11 |
| 6 | igeprn2014psyv | 12/8/2014 20:02 | -0.06149 | -78.39977 | 3.45561 | 3.88235 | 789440.928 | 9993197 |
| 7 | igeprn2014ptck | 12/8/2014 21:49 | -0.06499 | -78.42566 | 6.92309 | 3.67364 | 786556.578 | 9992809.11 |
| 8 | igeprn2014ptnk | 13/8/2014 03:23 | -0.03990 | -78.41518 | 4.11003 | 3.63250 | 787724.355 | 9995585.08 |
| 9 | igeprn2014pund | 13/8/2014 16:23 | -0.05832 | -78.41919 | 4.61473 | 3.85054 | 787277.266 | 9993547.15 |
| 10 | igeprn2014pvkq | 14/8/2014 04:16 | -0.05706 | -78.43289 | 6.63249 | 3.76099 | 785750.989 | 9993687.27 |
| 11 | igeprn2018lriu | 16/6/2018 00:39 | -0.35019 | -78.89811 | 7.75530 | 3.59307 | 733936.282 | 9961267.6 |
| 12 | igeprn2019foqh | 21/3/2019 03:48 | -0.03686 | -78.43320 | 4.69117 | 3.09595 | 785716.229 | 9995921.93 |
| 13 | igeprn2019foap | 21/3/2019 03:58 | -0.04087 | -78.43871 | 4.87083 | 3.34318 | 785103.498 | 9995477.79 |
| 14 | igeprn2019vzsg | 8/12/2019 08:56 | -0.04185 | -78.44035 | 9.65659 | 4.30201 | 784919.934 | 9995369.52 |
| 15 | igeprn2017ovch | 30/7/2017 18:30 | -0.18895 | -78.81899 | 4.66654 | 3.65960 | 742749.231 | 9979100.62 |
| 16 | igeprn2018gmes | 3/4/2018 01:15 | -0.16561 | -78.63573 | 3.44726 | 4.19746 | 763157.652 | 9981679.2 |
| 17 | igeprn2016fgfa | 15/3/2016 13:02 | -0.18812 | -78.48981 | 8.28749 | 4.27302 | 779410.122 | 9979186.64 |
| 18 | igeprn2017ozfm | 2/8/2017 00:40 | -0.19311 | -78.83645 | 3.21146 | 3.65229 | 740805.355 | 9978640.65 |

Nota. Tomado de *Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional. Catálogo Sísmico IGEPRN*, por (IGEPRN, 2020).

En la tabla anterior se puede visualizar, los reportes de datos del IGEPRN, muestran las diferentes magnitudes de los sismos ocasionados en la ciudad de Quito desde el año 2011 hasta el 2019 información de gran aporte para el desarrollo de este proyecto.

Es importante definir un modelo de cálculo en el cual se generen espectros en diferentes puntos del sector de estudio asociados al producirse un sismo en uno de los segmentos de falla y con una magnitud máxima, es por eso que se presenta a continuación la caracterización de la sismicidad.

Caracterización de la sismicidad

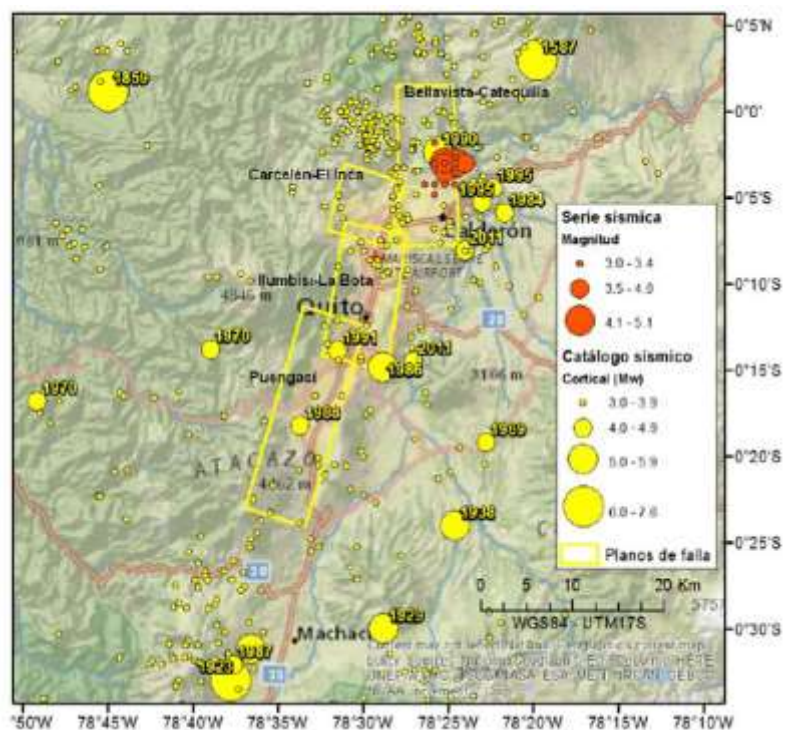
En la investigación desarrollada por Parra (2016) determinó que la ciudad de Quito puede generar terremotos en un rango de magnitud de Mw 5.7 - 6.4, y su distribución de sismicidad de forma homogénea con terremotos históricos de magnitud (Mw) 5.8 a 6.4.

Según la investigación desarrollada por Aguiar et al. (2017) determinó que para las estructuras de la ciudad de Quito proviene del sistema de fallas ciegas inversas en las que se asienta la ciudad se esperan sismos que varían entre 6.2 y 6.5 de magnitud de acuerdo al segmento de falla en el que se originen.

A continuación se puede visualizar en la siguiente imagen los epicentros de los sismos asociados a las fallas de Quito en diferentes años, cuya proyección en superficie mostrada en rectángulos amarillos, corresponden de sur a norte a las fallas de Puengasí; Ilumbisí-La Bota (ILB); Carcelén-El Inca (CEI); Bellavista-Catequilla (BC); y Tangahuilla coincidiendo en un 70% aproximadamente con el núcleo urbano de Quito convirtiéndola en una ciudad con un alto grado de peligrosidad sísmica (Rivas et al., 2014).

Figura 16

Sismos asociados a las fallas ciegas de Quito



Nota. La figura muestra el catálogo sísmico asociado a las fallas ciegas de Quito. Tomado de *Determinación el 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* (p.205), por Rivas et al., 2014.

Es importante conocer las características de las fallas ciegas de Quito para realizar un correcto estudio, para lo cual se hace mención al estudio de la tectónica activa de Quito y del sistema de fallas que cruza la ciudad detallado a continuación y realizado por Alvarado et al.,(2014).

Tabla 7

Caracterización de los segmentos del sistema de fallas Quito

| Falla | Magnitud Mw (AR) | Longitud de superficie de ruptura (km) | Área Ruptura (km ²) | Magnitud Mw (SRL) | DIP | RAKE |
|------------------|------------------|--|---------------------------------|-------------------|------|------|
| Tangahuilla | 6.0 | 12.0 | 108 | 6.0 | 55.0 | 90.0 |
| Carcelén el Inca | 5.9 | 7.0 | 82 | 5.7 | 55.0 | 90.0 |
| Ilumbisi la Bota | 6.2 | 15.0 | 176 | 6.2 | 55.0 | 90.0 |
| Puengasí | 6.4 | 22.0 | 259 | 6.4 | 55.0 | 90.0 |

Nota. Tomado de *Desarrollos metodológicos y aplicaciones hacia el cálculo de la peligrosidad sísmica en el Ecuador Continental y estudio de riesgo sísmico en la ciudad de Quito* (p.125), por (Parra, 2016).

La tabla muestra las estimaciones de magnitud máxima por área de ruptura (AR) y ruptura superficial larga (SRL); DIP, ángulo aproximado de buzamiento; Rake, ángulo aproximado de deslizamiento de las fallas de Quito, correspondiente al sistema de fallas Quito (Parra, 2016).

En diferentes estudios realizados sobre peligrosidad sísmica como el de Aguiar et al. (2017), asocia la falla Ilumbisi- La Bota con el centro norte y norte de Quito, siendo ubicación del sector de estudio el Barrio San Enrique de Velasco; y los resultados mostrados en dichos análisis de amenaza sísmica, permitirán tener una referencia con los obtenidos en el software OpenQuake es por esto que se asociará a dicha falla.

Además los sismos se clasifican según sus niveles de peligro y período de retorno, para la verificación de su desempeño tal como nos muestra la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC, (2015) en la siguiente tabla.

Tabla 8*Niveles de amenaza sísmica*

| Nivel de sismo | Sismo | Probabilidad de excedencia en 50 años | Periodo de retorno T_r (años) | Tasa anual de excedencia ($1/T_r$) |
|----------------|----------------------|---------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|
| 1 | Frecuente (menor) | 50% | 72 | 0.01389 |
| 2 | Ocasional (moderado) | 20% | 225 | 0.00444 |
| 3 | Raro (severo) | 10% | 475 | 0.00211 |
| 4 | Muy raro* (extremo) | 2% | 2 500 | 0.00040 |

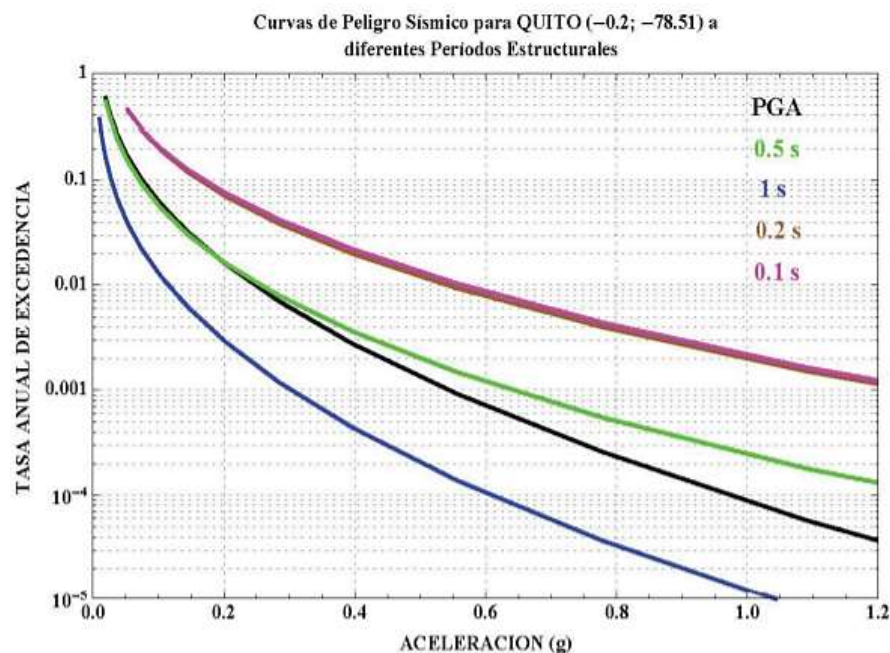
Nota. La tabla muestra los niveles de amenaza sísmica. Tomado de *Peligro Sísmico Diseño sismo resistente NEC2015* (p.41), por (NEC-SE-DS, 2015).

Para lo cual, siendo el sector de estudio un Barrio donde las estructuras son de uso residencial, se considera el nivel de amenaza de un sismo raro (severo) con sismo de diseño como lo menciona en la NEC-SE-DS, (2015) con un período de retorno de 475 años y una probabilidad de excedencia en 50 años del 10%.

Como aporte para este estudio de peligrosidad cabe mencionar la investigación de Parra (2016), donde se han encontrado en la desagregación de la amenaza que la mayor fuente proviene de sismos cuyo epicentro se halla en un radio de 30 km y una magnitud alrededor de 6.25 y se efectuaron estudios para períodos de retorno de 475 años y 2475 años, dicho aporte es de importancia para este proyecto permitiendo comparar los resultados obtenidos, además cabe recalcar la curva de peligro sísmico a diferentes períodos estructurales donde se muestra los valores de PGA para la ciudad de Quito, que se puede visualizar en la siguiente figura.

Figura 17

Curvas de peligro sísmico, Quito



Nota. La figura proporciona las aceleraciones máximas en el terreno (PGA) y aceleraciones máximas espectrales para diferentes niveles de probabilidades anual de excedencia. Tomado de *Peligro Sísmico Diseño sismo resistente NEC2015*, por (NEC-SE-DS, 2015).

Ecuaciones de Atenuación

El uso de las ecuaciones de atenuación es desarrollado por expertos a partir del registro de eventos sísmicos reales. Estas ecuaciones permiten conocer la intensidad sísmica de aceleración, velocidad, desplazamiento, entre otras, en un sitio, a partir de la cual se genera el sismo y el valor de la magnitud del mismo (Cañizares, 2017).

Según Hinestroza, (2018) las ecuaciones de atenuación que mejor se adaptan a cada región tectónica y su influencia y usadas en el proyecto SARA se ilustran en la siguiente tabla.

Tabla 9

Ecuaciones de predicción de movimiento (GMPE) usadas en el modelo de amenaza sísmica del proyecto SARA

| Tipo de región tectónica | Ecuación de predicción de movimiento (GMPE) | Influencia |
|-----------------------------|---|------------|
| Subducción interfase | Zhao et al. (2006) | 33.3% |
| | Abrahamson et al. (2015) | 33.3% |
| | Montalva et al. (2016) | 33.3% |
| Subducción intraplaca | Abrahamson et al. (2015) | 50.0% |
| | Montalva et al. (2015) | 50.0% |
| Corteza superficial activa | Akkar et al. (2014) | 33.3% |
| | Bindi et al. (2014) | 33.3% |
| | Boore et al. (2014) | 33.4% |
| Corteza superficial estable | Tavakoli & Pezeshk (2005) | 50.0% |
| | Atkinson & Boore (2006) | 25.0% |
| | Drouet & Brazil (2015) | 25.0% |

Nota. En la siguiente tabla se establece las ecuaciones de predicción de movimiento (GMPE) con su porcentaje de influencia de acuerdo al tipo de región tectónica. Tomada de *Evaluación del riesgo sísmico de Viviendas de Barrancabermeja (Colombia)* (p. 22), por (Hinestroza, 2018).

Es importante conocer que las GMPE son funciones que permiten determinar valores de aceleración en función de parámetros sismológicos como magnitudes y ubicaciones del sismo (IGEPN, 2016).

Con la finalidad de elegir las ecuaciones de predicción de movimiento fuerte (GMPE) para la zona de estudio es importante la recopilación de información que enriquezca el desarrollo de este proyecto de investigación.

Dentro de la investigación desarrollada por Fernando Cañizares & Singaicho (2018) recomiendan para estudios de riesgo sísmico de Quito o para ciudades con características geológicas similares se pueda utilizar los modelos de atenuación de Akkar y Bommer 2013 y Bindi 2013, dichos modelos se encuentran validados por los eventos reales registrados en la red RENAC del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional.

Las recomendaciones de la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC 15) para las ecuaciones de atenuación (GMPES) en su capítulo 10 en la sección 10.1.1. Fundamentos de mapa y zonificación recomienda que para el estudio de peligro sísmico se debe considerar:

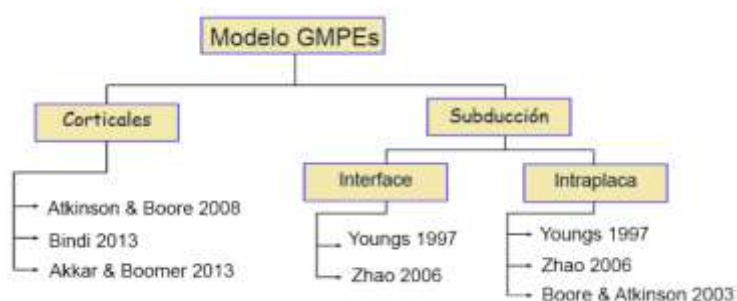
En el Ecuador el origen de los sismos proviene de dos fuentes:

- a) Por subducción de la placa de Nazca que induce a la placa Sudamericana
- b) Por la presencia de fallas locales corticales, ejemplos sistema de fallas de Quito.

La utilización de las ecuaciones de predicción, válidas por el Global Earthquake Model, para fuentes intraplacas: Boore y Atkinson (2008), Akkar y Boomer (2010), Kano et al. (2006), Bindi (2009), para fuentes de subducción: Youngs (1997), Atkinson y Boore (2003), Kanno (2006); McVerry et al. (2006); Lin Lee 2008 y Zhao et al. (2006).

Figura 18

Modelo GMPEs



Nota. La figura proporciona los modelos GMPEs para tipo cortical y subducción. Tomado de *Selección de ecuaciones de atenuación (GMPEs) compatibles con el sistema de fallas de Quito*, por Freddy Cañizares, 2017.

Dado que la ciudad de Quito es de tipo cortical para las ecuaciones de atenuación se trabaja con el modelo de Atkinson & Boore 2008, Bindi 2013 y Akkar & Boomer 2013, pero es importante tomar en cuenta que en el software OpenQuake dichos modelos se presentan de la siguiente manera: Atkinson & Boore 2008, Bindi et al 2011 y Akkar & Boomer 2010, continuación se detallará las características de dichos modelos.

Atkinson & Boore 2008

La ecuación fue desarrollada mediante regresiones estadísticas de los registros tomados de la base de datos “Pacific Earthquake Engineering Research Center’s Next Generation Attenuation” (PEER NGA)

Las características del modelo son las siguientes:

- Rango de Magnitud (Mw) 5-8

- Distancia aplicable: 0-400km; Distancia Rjb < 200km.
- Velocidad de onda de corte a los 30 metros Vs30: entre 180-1300 m/s.
- Periodo: 0.001s-10s.
- Fallas: Normal, inversa, strike slip y falla desconocida.

Cabe mencionar que las características que tiene este modelo se ajustan con los parámetros establecidos para desarrollar este estudio.

Bindi et al 2011

Según Cañizares, (2017) este modelo fue desarrollado para Europa del Este, los parámetros que calcula este modelo es la aceleración pico del terreno PGA, PVC y espectro con la pseudo – aceleración al 5% de amortiguamiento y un período entre 0.002 y 3 seg.

Las características del modelo son las siguientes:

- Rango de Magnitud (Mw) 4 a 6.9
- Distancia a la fuente entre 0 – 200km. Distancia Rjb 100km.
- Fallas: Normal, inversa, strike- slip y falla desconocida.
- Velocidad de onda de corte a los 30 metros Vs30: entre 180-1300 m/s.
- El tipo de suelo se clasifica de acuerdo al Eurocódigo EC8: A, B, C, D y se clasifica dependiendo de la velocidad de onda de corte Vs30.
 - Suelo Tipo A: Vs30 >800m/s.
 - Suelo Tipo B: 360<Vs30<800m/s.
 - Suelo Tipo C: 180<Vs30<360m/s
 - Suelo Tipo D: Vs30<180m/s.

Además, que se han realizado estudios en el norte de la ciudad, sector como Calderón que está ubicado cerca del sector de este estudio, y con las características de este modelo se visualiza que se ajustan a este proyecto.

Akkar & Boomer 2010

En el estudio de Molina, (2019) indica que es un modelo para la predicción del espectro elástico de respuesta en términos de pseudo aceleraciones espectrales, PGA y velocidad.

Las características del modelo son las siguientes:

- Rango de Magnitud (M_w) 5-7.6.
- Rango de períodos de 0.01 a 4s
- Fallas: Normal, inversa, strike- slip
- Profundidad: Profundidades menores a 30 km. (Depth) para sismos corticales. Distancia Rjb, Repi y Rhyp.: 0- 200km
- Vs30: 150m/s - 1200m/s.
- Tipo de Suelo: Eurocódigo: Vs30
 - Clase A: $V_{s30} \geq 800$ m/s.
 - Clase B: $360 \text{m/s} \leq V_{s30} \leq 800$ m/s.
 - Clase C: $180 \leq V_{s30} \leq 300$ m/s.
 - Clase D: $V_{s30} < 180$ m/s

Efectos de sitio

Los efectos de sitio determinan si el suelo produce suficiente amplificación de ondas sísmicas para adquirir un valor de diseño, por lo tanto, para la obtención del

espectro de respuesta dinámica del suelo en la superficie, las características dinámicas, la profundidad del depósito del suelo donde se va a ubicar la estructura, es de importancia tener una zonificación y una microzonificación sísmica de la ciudad, con la finalidad de conocer el comportamiento dinámico del suelo de fundación de la estructura ante un movimiento telúrico (Valverde et al., 2002).

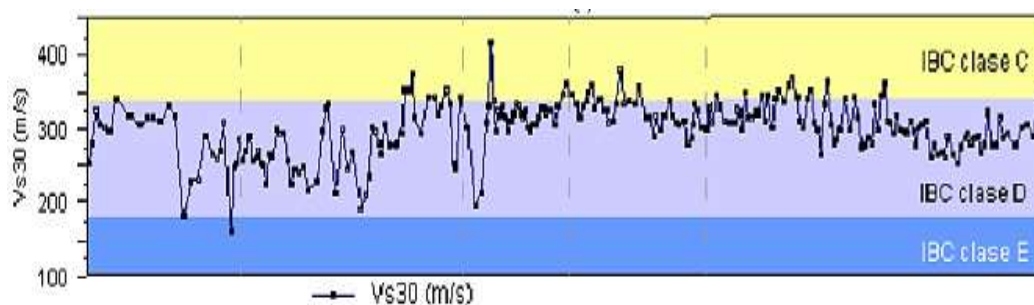
Además, los efectos de sitio son aquellos que influyen en la variación de las intensidades sísmicas, dicho concepto es importante para estimar la amenaza sísmica a nivel de superficie del terreno.

El parámetro que ha demostrado aproximarse a los efectos de sitio generado por un sismo es el promedio de la velocidad de onda de corte a los 30m de profundidad denominada V_{s30} , es importante saber que en las zonas con inclinaciones bajas se asocian a velocidad de onda de corte bajas por otro lado las zonas de altas pendientes se asocian a suelos en roca con altas velocidades de corte (Hinestroza, 2018).

La siguiente figura muestra que la mayor parte de los suelos de Quito, son clase "D" de acuerdo a la clasificación del IBC International Building Code (2003), con velocidades de la onda de corte comprendidas entre 180 y 340 m/s, demostrando que no es tan resistente el suelo de Quito, pero tampoco es malo (Aguiar & Chunga, 2013).

Figura 19

Velocidad de la onda de corte y períodos de vibración



Nota. La figura muestra las velocidades de la onda de corte entre 180 y 340 m/s. Tomado de *Microzonación sísmica del Centro Norte de Quito. Segunda Jornada de Investigación científica desde las Aulas 2013* (p.10), por Aguiar & Chunga, 2013.

Además dentro del estudio de Quizanga (2015) se realizó los sondeos en diferentes puntos para valores de V_{s30} y su correspondiente tipo de suelo el mismo que se lo va a emplear para el presente estudio tomando en cuenta que el Barrio San Enrique de Velasco pertenece a la parroquia El Condado.

Tabla 10

Valores de Vs30 en diferentes puntos de la ciudad de Quito

| Valores de Vs ₃₀ para diferentes puntos | | | | | | | |
|--|--------|---------|------------------------|----------|-----------|-------------------------|------------------------|
| Item | Nombre | Autor | Ubicación | Este | Norte | Vs ₃₀ m/s | NE C - 1 5 |
| 1 | MSQ11 | ERN12 | Solanda | 774129,4 | 9969787,0 | 211 | D |
| 2 | MSQ10 | | Chimbacalle | 776641,9 | 9972714,0 | 241 | |
| 3 | MSQ6 | | La Gasca | 777579,4 | 9978134,0 | 345 | |
| 4 | MSQ4 | | Quito tenis | 779166,8 | 9981621,0 | 299 | |
| 5 | MSQ3 | | Andalucia | 778269,8 | 9984391,0 | 270 | |
| 6 | MSQ2 | | Real audiencia | 780065,9 | 9986862,0 | 347 | |
| 7 | MSQ1 | | Condado | 778905,1 | 9989138,0 | 242 | |
| 8 | PM1 | PLANMAN | Liceo Fernández Madrid | 777156,7 | 9974843,0 | 441 | C |
| 9 | PM2 | | Escuela Sucre | 777166,9 | 9975232,0 | 228 | D |
| 10 | PM3 | | Colegio Benalcázar | 780514,7 | 9979795,0 | 578 | C |
| 11 | PM4 | | Escuela Espejo | 778053,2 | 9976817,0 | 398 | C |
| 12 | Q2 | METRO | Quitumbe | 772330,5 | 9968306,0 | 280 | D |
| 13 | Q4 | | Moran Valverde | 773182,0 | 9968920,0 | 315 | |
| 14 | Q8 | | Solanda | 773073,5 | 9970171,0 | 225 | |
| 15 | Q16 | | El calzado | 774490,0 | 9972251,0 | 220 | |
| 16 | Q20 | | El recreo | 776045,5 | 9973076,0 | 260 | |
| 17 | Q24 | | La magdalena | 775898,0 | 9974344,0 | 300 | |
| 18 | Q30 | | San Francisco | 777100,5 | 9975660,0 | 315 | |
| 19 | Q41 | | La alameda | 778193,0 | 9977027,0 | 315 | |
| 20 | Q45 | | U central | 778331,5 | 9978874,0 | 320 | |
| 21 | Q52 | | La pradera | 780137,0 | 9979838,0 | 310 | |
| 22 | Q55 | | La carolina | 780651,0 | 9980530,0 | 340 | |
| 23 | Q57 | | Inaquito | 780245,5 | 9981218,0 | 300 | |
| 24 | Q59 | | Jipijapa | 780250,0 | 9981607,0 | 285 | |
| 25 | Q62 | | El labrador | 779751,0 | 9983578,0 | 275 | |

Nota. En la siguiente tabla se establece los valores de Vs30 en diferentes puntos siendo de aporte los datos de la parroquia El Condado con un Vs30 de 242 m/s. Tomada de *Espectros específicos de desplazamiento para la zona urbana de la ciudad de Quito a partir de ecuaciones empíricas* (p. 62), por (Cabrera & Pérez, 2018).

Clasificación de los suelos

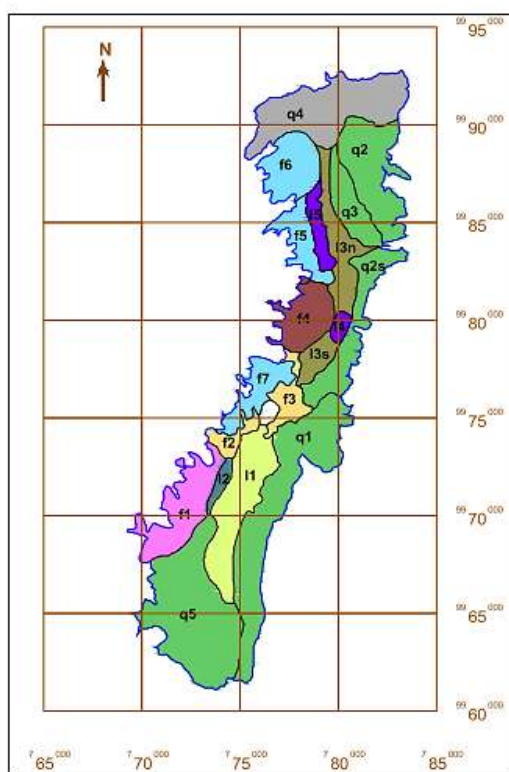
Según Aguiar & Chunga, (2013), se han realizado dos trabajos de clasificación de los suelos de Quito, aunque en algunos casos con datos de suelo superficiales el primero realizado por la Escuela Politécnica Nacional en 1994, que trabajaron con

muestras más profundas llegando a 25m, el segundo realizado en 2002, donde la clasificación de los suelos se hizo en base a los tipos de suelos considerados por el Código Ecuatoriano de la Construcción (CEC-2000), y un trabajo de microzonificación realizado en el 2012 por ERNAL, Evaluación de Riesgos Naturales en América Latina de Colombia, datos que han sido de gran aporte para el desarrollo de este proyecto.

El estudio de Aguiar, R. presenta la microzonificación sísmica de Quito.

Figura 20

Zona de suelos similares



Nota: La figura muestra las zonas de suelos con colores, de acuerdo a sus características similares. Tomado de *Microzonificación sísmica del Centro Norte de Quito. Segunda Jornada de Investigación científica desde las Aulas (2013)* (p.6), por Aguiar & Chunga, 2013.

Las características mostradas en la figura se resume en la siguiente tabla:

Tabla 11

Zonas de suelos con sus respectivas características

| Características | Códigos de zonas de suelos similares |
|--|--------------------------------------|
| Muy similares | q1, q2, q3, q5 |
| Cangahua recubierta con arena volcánica de poca resistencia | q4 |
| Suelos lacustres | I1,I2,I3 |
| Parque la Carolina: Nivel freático alto, Suelos lacustres con primeros estratos de gran espesor y de poca resistencia. | I4 |
| Cubierta por material aluvial de la zona f5 | I5 |
| Similares | f2,f3 |
| Pueden ser Compatibles | f5,f6,f7 |

Nota. Tomada de *Microzonificación sísmica del Centro Norte de Quito. Segunda Jornada de Investigación científica desde las Aulas (2013)*, por (Aguiar & Chunga, 2013)

Dicho estudio presenta los períodos de vibración de cada zona de suelo mostrados en la siguiente tabla.

Tabla 12

Períodos de vibración en cada zona de suelo

| Zona | F1 | F2 | F3 | F4 | F5 | F6 | F7 | L1 | L2 |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| T | 0.178 | 0.309 | 0.302 | 0.121 | 0.116 | 0.179 | 0.068 | 0.322 | 0.287 |
| Zona | L3 | L4 | L5 | Q1 | Q2n | Q2s | Q3 | Q4 | Q5 |
| T | 0.324 | 0.201 | 0.148 | 0.299 | 0.116 | 0.211 | 0.198 | 0.064 | 0.289 |

Nota. Tomada de *Microzonificación sísmica del Centro Norte de Quito. Segunda Jornada de Investigación científica desde las Aulas (2013)* (p.7), por (Aguiar & Chunga, 2013).

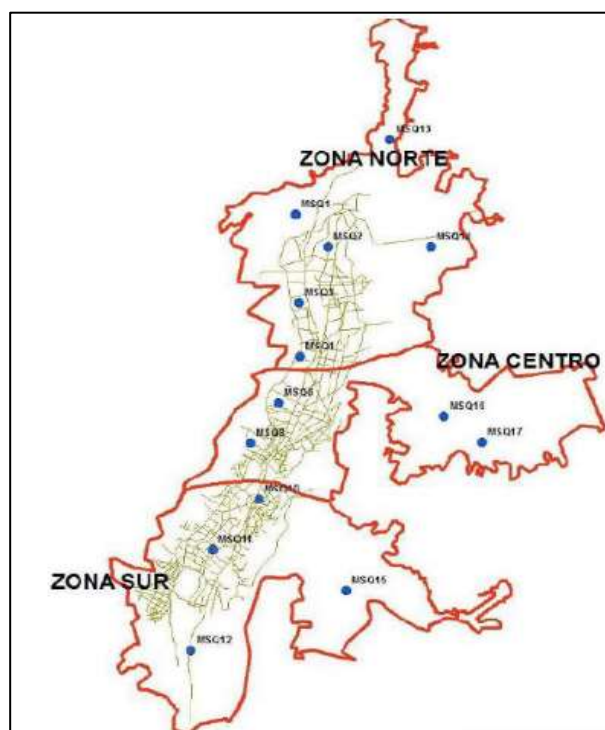
En el Código ecuatoriano de la Construcción (CEC) 2000 los suelos se clasifican como S1 que corresponde a los suelos muy duros y velocidad de la onda de corte >750

m/s, S2 es un suelo duro, S3 es un suelo blando con períodos de vibración mayor a 0.6 s y S4 es un suelo muy blando con características especiales. En la ciudad de Quito existen suelos S1, S2 y S3 de acuerdo al estudio realizado por EPN en el 2002 (Chávez, 2016).

En el estudio de suelo de ERN, cubrieron toda la ciudad de Quito como se puede visualizar en la siguiente imagen, enriqueciendo de información en la zona norte, como del sector del Condado, información de gran aporte para el desarrollo de este proyecto.

Figura 21

Ubicación de los puntos de estudio de los suelos



Nota. Tomado de *Microzonación sísmica del Centro Norte de Quito. Segunda Jornada de Investigación científica desde las Aulas (2013)* (p.11), por Aguiar & Chunga, 2013.

En la zona norte, la ubicación de los puntos del sector del Condado, con código MSQ1, y una latitud y longitud de -0.098179 y -78.494450 respectivamente, donde se

realizó ensayos de penetración estándar, Down Hole y Refracción sísmica, aportando con valores de velocidad de onda de corte, períodos de vibración de los suelos etc. Dicha información es muy importante para el desarrollo de este proyecto, en forma general se puede indicar que el suelo de la ciudad de Quito es una cangahua, el cual es resistente a cargas verticales.

Clasificación de los suelos según la NEC15

Tabla 13

Clasificación de los perfiles de suelo

| 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. Se contemplan las siguientes subclases: | |
| | F1—Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como; suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc. | |
| | F2—Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas (H > 3m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas). | |
| | F3—Arcillas de muy alta plasticidad (H > 7.5 m con índice de Plasticidad IP > 75) | |
| | F4—Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda (H > 30m) | |
| | F5—Suelos con contrastes de impedancia α ocurriendo dentro de los primeros 30 m superiores del perfil de subsuelo, incluyendo contactos entre suelos blandos y roca, con variaciones bruscas de velocidades de ondas de corte. | |
| F6—Rellenos colocados sin control ingenieril. | | |

Nota. Tomado de *Peligro Sísmico Diseño sismo resistente (p.30)*, por (NEC-SE-DS, 2015).

Modelo de amenaza Sísmica

Para el desarrollo de amenaza sísmica del Barrio San Enrique de Velasco de la ciudad de Quito, se comienza con el cálculo de los campos de movimiento del terreno, que describen la intensidad con que se siente la agitación del terreno en una serie de lugares definidos por una latitud y longitud, para lo cual se calculará la mediana de la intensidad más una componente de variabilidad aleatoria, posteriormente se ejecutará los cálculos usando el programa de acceso libre OpenQuake-engine v3.10.1 – OQ plugin v3.10.1 y se analizará los resultados usando el software de información geográfica Qgis 3.10.11 'A Coruña'. A continuación, se desarrolla el modelo de amenaza sísmica.








Elaboración de la base de datos georreferenciada

Como inicio del desarrollo de este capítulo se organiza la información catastral que se obtuvo de la página del Municipio de Quito de la Secretaria General de Planificación, (2020) en formato shape, CAD y Excel, y GEM Hazard Blog, (2020) para las fallas activas desarrolladas por GEM la gestión de los mismos se realiza utilizando el módulo ArcMap de la plataforma ArcGIS versión 10.4.1. y la plataforma Qgis mencionada anteriormente.

La información que representa el SIG muestra los aspectos de la realidad del análisis para el estudio del riesgo, dicha información contiene en cada capa su modelo vectorial de los polígonos establecidos, a continuación, se indica la siguiente tabla con la información organizada de la siguiente manera:

Tabla 14

Organización del sistema de información geográfica de la ciudad de Quito

| Aspecto | Modelo Vectorial | Nombre | Capa |
|------------------|------------------|----------------------------------|---|
| Distrito | Polígono | Limite_dmq.shp |  |
| Administraciones | Polígono | Administración_Zonal.shp |  |
| Barrio-Sector | Polígono | Barrios de Quito.shp |  |
| Manzanas | Polígono | Manzanas_DMQ.shp |  |
| Lotes | Polígono | lotes_com_pisos.shp |  |
| Construcciones | Polígono | cat_bloque.shp |  |
| Falla activa | Polígono | gem_active_faults_harmonized.shp |  |

Nota. Tomado de *Gobierno abierto de Quito*, por *Elaboración propia*.

Los archivos mencionados anteriormente tienen los límites de las siguientes unidades espaciales: Distrito, Administraciones, parroquias y Barrios pertenecientes al Distrito Metropolitano de Quito, Manzanas integradas de cada Barrio, lotes ubicados en cada Manzana, construcciones en cada manzana y las fallas activas de Quito desarrolladas por el GEM cada archivo en formato shape (shp) como modelos

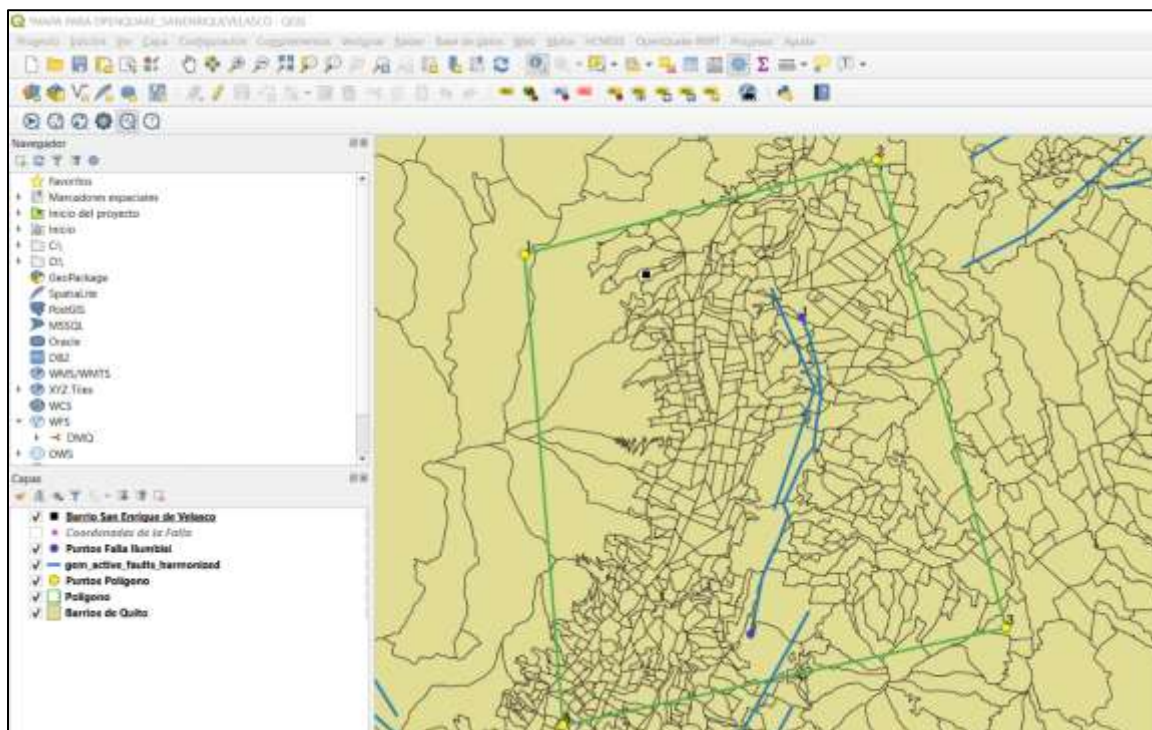
vectoriales de polígonos irregulares y referenciados en el sistema de coordenadas UTM (del inglés Universal Transverse Mercator) zona 17 Sur para gestionar los resultados en Qgis 3.10.11 'A Coruña'.

Escenario de amenaza sísmica

Como se indicó anteriormente el cálculo del riesgo requiere en primer lugar la definición de un escenario de amenaza sísmica, al cual se someterán los elementos expuestos. Para ello se realiza en el programa Qgis el siguiente escenario sísmico, representado de la siguiente manera: un polígono de color verde que abarca el Barrio San Enrique de Velasco sector de análisis del presente proyecto, y la falla inversa Ilumbisí la Bota, dicho polígono se realizó para poder visualizar de mejor manera los resultados de las intensidades de movimiento del terreno; consta de 4 vértices representados de color amarillo y ubicados de acuerdo a las manecillas del reloj dato importante para la introducción en el programa OpenQuake, estos poseen sus coordenadas en latitud y longitud con el sistema de coordenadas mencionado anteriormente.

Figura 22

Mapa del Barrio San Enrique de Velasco, falla inversa de Quito Ilumbisí- La Bota y polígono donde se calculará las intensidades del terreno realizado en el software Qgis.



Nota. Obtenido del QGIS de la información geográfica y elaboración propia.

Las coordenadas del polígono se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 15

Puntos del polígono

| Puntos polígonos | | |
|------------------|----------------|-----------------|
| Numero | Latitud | Longitud |
| 1 | -0.094354821 | -78.560362551 |
| 2 | -0.0571832885 | -78.4228360379 |
| 3 | -0.2410497765 | -78.37216567629 |
| 4 | -0.27944499495 | -78.54525555994 |

Nota: Obtenido del QGIS de la información geográfica y elaboración propia.

Ruptura

Para definir el hipocentro de la falla, tomamos como punto de partida la información geográfica de la falla en sus puntos extremos que utilizaremos para definir el Strike o Rumbo de la falla, que necesitamos como parámetro para definir la geometría de la ruptura. Los puntos más extremos se muestran en coordenadas UTM en la siguiente tabla extraída del QGIS:

Tabla 16

Puntos extremos de la falla Ilumbisí – La Bota en coordenadas UTM

| | fid | X | Y |
|---|-----|------------------|------------------|
| 1 | 1 | 783602,499955... | 9986809,55953... |
| 2 | 2 | 781395,438429... | 9973051,52432... |

Nota: Obtenido del programa QGIS de la información geográfica de las fallas inversas desarrolladas por el GEM.

Con las coordenadas obtenidos anteriormente y la función arco tangente obtenemos el ángulo Strike o Rumbo de la falla:

$$\varphi = 90^\circ - \text{Arctang} \left(\frac{9986809,5595 - 9973051,5243}{783602,4999 - 781395,4384} \right)$$

$$\varphi = 9,1137^\circ$$

Dichos puntos anteriormente obtenidos de la falla ILB, obtenemos el punto medio aproximado de la falla inversa en coordenadas UTM, que pertenece al hipocentro de la falla.

$$\text{Hipocentro} = \left(\frac{783602,4999 + 781395,4384}{2}; \frac{9986809,5595 + 9973051,5243}{2} \right)$$

$$\text{Hipocentro}_{UTM} = (782498,96915 ; 9979930,5419)$$

Estas coordenadas UTM se las representa en coordenadas geográficas con la finalidad de introducir en el software OpenQuake, y se las muestra en la siguiente tabla:

Tabla 17

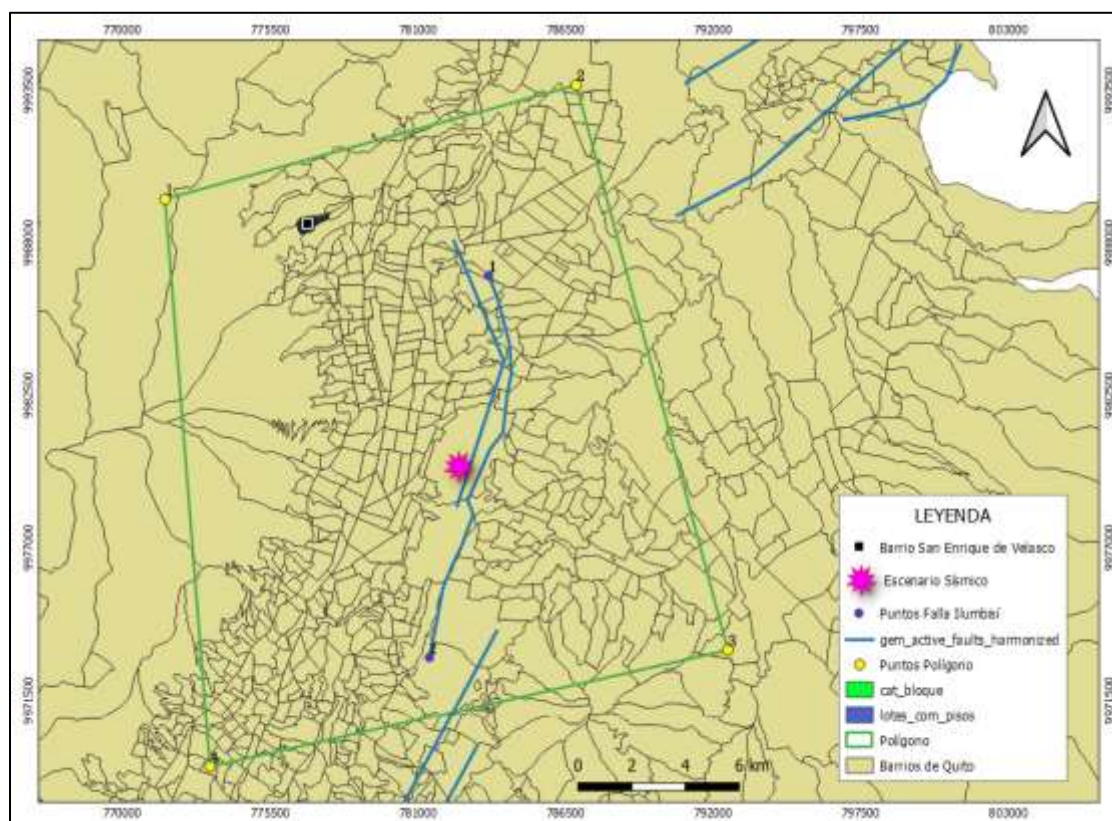
Coordenadas geográficas de la falla ILB

| Número | Latitud | Longitud |
|--------|-------------|-----------------|
| 1 | -0.18139537 | -78.46207636290 |

Nota: Obtenido del cálculo del punto medio aproximado de la falla inversa ILB y elaboración propia.

Figura 23

Mapa de ruptura y Barrio San Enrique de Velasco



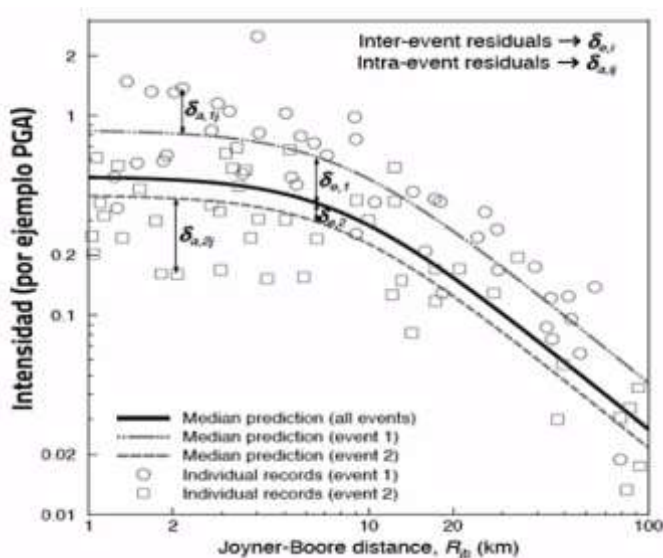
Nota. Obtenido del software de información geográfica QGIS, por elaboración propia.

Nivel de truncamiento

Tal y como se mencionó en el marco teórico los modelos de movimiento del terreno, describe una mediana de la intensidad, en la siguiente figura tomada del Global Earthquake Model, (2020), describe en la línea más gruesa una atenuación suave a mayor distancia de la ruptura, para tomar en cuenta la variabilidad, la intensidad debe calcularse como la media pre dicha del modelo más una variabilidad aleatoria, el programa OpenQuake permite escoger que tan alejada de la tendencia central será la variabilidad aleatoria que queremos incluir en el cálculo, el parámetro de nivel de truncamiento hace referencia al número de desviaciones estándar a considerar.

Figura 24

Variabilidad de la intensidad



Nota: En la siguiente figura muestra un ejemplo de las intensidades desarrolladas en el terreno, en el eje de las x el parámetro de distancia con respecto a la ruptura y en el eje y, las intensidades con que se siente la agitación del terreno. Tomado de *OpenQuake – Movimiento del Terreno: Marco Teórico*, por Global Earthquake Model, 2020.

Para el cálculo de la mediana de movimiento del terreno se tomará un nivel de truncamiento de 0, es decir todas las intensidades serán el resultado de la media sin ninguna desviación, debido a que si se realiza más de una simulación sería insignificante ya que todas tendrían el mismo resultado por ende el parámetro del número de campos de movimiento del suelo será 1.

Para el cálculo de la variabilidad del movimiento del terreno se tomará un nivel de truncamiento de 3, es decir la variabilidad puede estar a 3 desviaciones estándar de la media, y para el parámetro del número de campos de movimiento del suelo será 1000

simulaciones de movimiento del terreno por cada GMPE debido a que la variabilidad se muestrea de forma aleatoria.

Cálculo en el programa OpenQuake

Para poder generar campos de movimiento de terreno, primero debemos preparar los archivos de entrada para OpenQuake, a continuación, se puede visualizar el diagrama de flujo para un escenario sísmico en OpenQuake.

Figura 25

Diagrama de flujo para un escenario sísmico en OpenQuake



Nota. Tomado de *OpenQuake- Movimiento del Terreno: Ejercicio Práctico*, por (Global Earthquake Model, 2020).

El primero es el Archivo de Ruptura que contiene los parámetros que definen la ruptura, como la magnitud y los ángulos de movimiento, el segundo archivo es el de modelos de movimiento del terreno este archivo contiene los GMPE que escogemos para generar campos de movimiento del terreno por ultimo tenemos el archivo llamado job este contiene los parámetros referentes al cálculo que queremos realizar por ejemplo en este archivo especificaremos que vamos a usar la calculadora de escenarios del software (Global Earthquake Model, 2020).

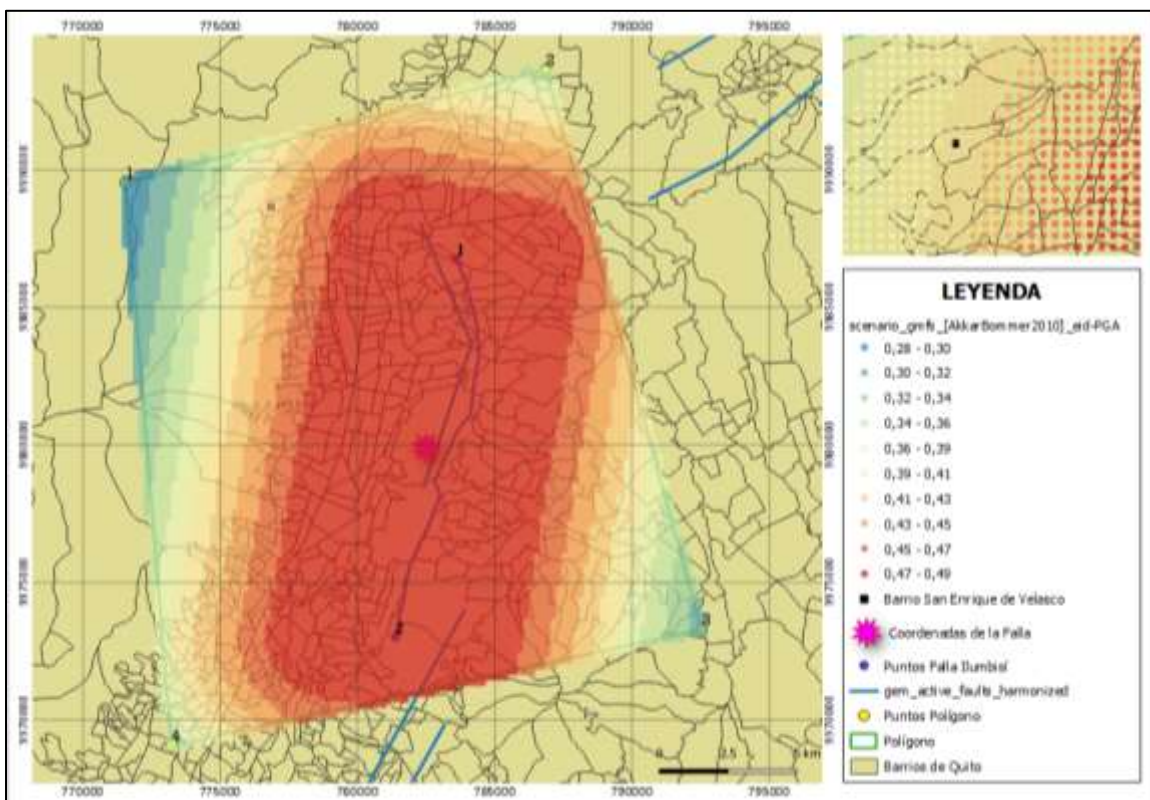
Modelo de resultados Qgis

Los valores del pico de aceleración efectiva del terreno (PGA) y aceleración espectral (Sa) 0.3s y 1.0s en los diferentes modelos de movimiento del terreno mencionados anteriormente fueron modelados en el programa OpenQuake, y visualizados los resultados en el software de información geográfica Qgis.

Modelo Akkar & Bommer 2010

Figura 26

Valores de PGA en el modelo Akkar & Bommer 2010

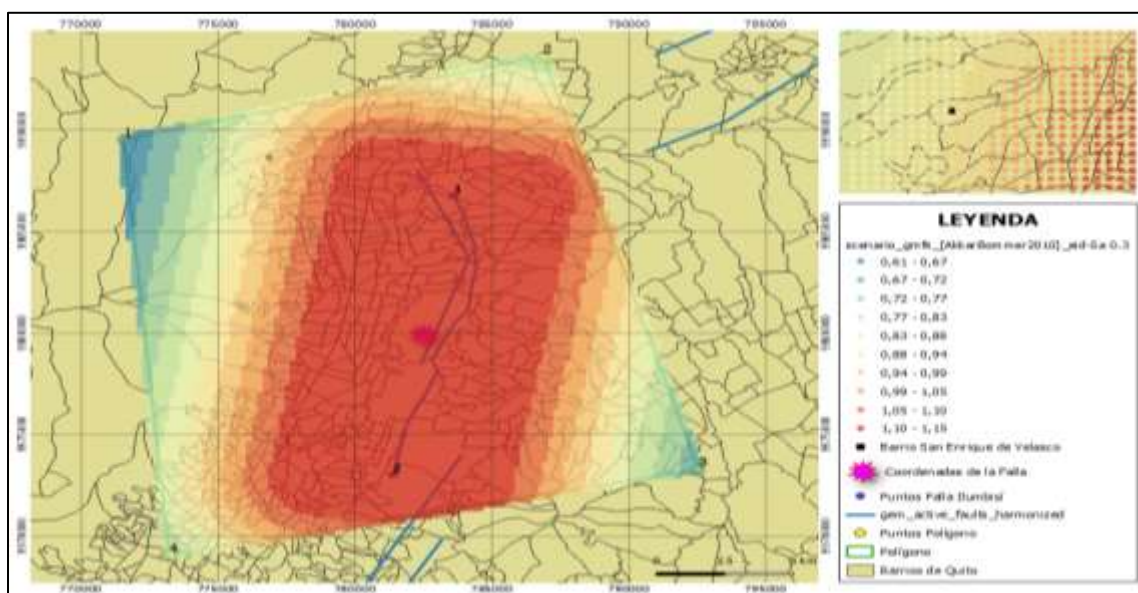


Los modelos de la Mediana del movimiento del terreno son los siguientes:

Nota. En la figura se puede visualizar los valores de PGA de 0.41 – 0.43g para el Barrio San Enrique de Velasco. Tomado del programa Qgis, por Elaboración propia.

Figura 27

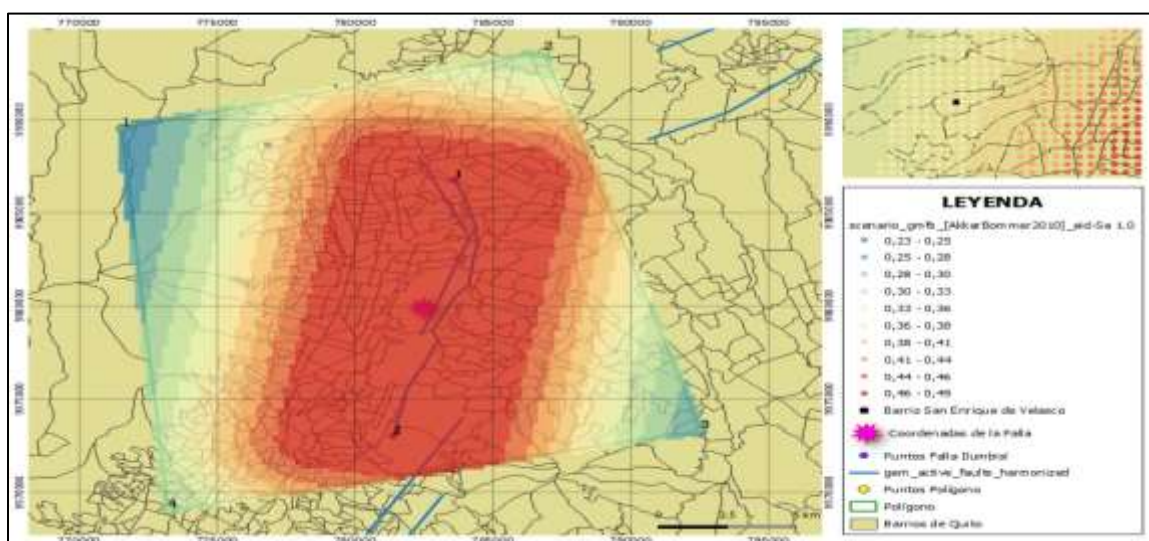
Valores de Sa 0.3 en el modelo Akkar & Bommer 2010



Nota. En la figura se puede visualizar los valores de Sa 0.3s de 0.88s – 0.99s para el Barrio San Enrique de Velasco. Tomado del programa Qgis, por Elaboración propia.

Figura 28

Valores de Sa 1.0 en el modelo Akkar & Bommer 2010

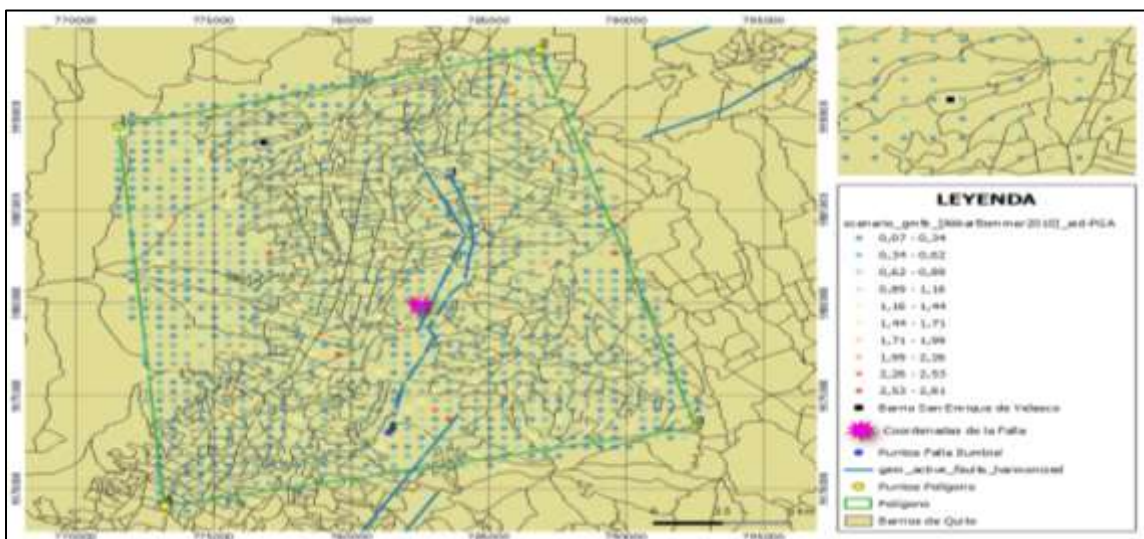


Nota. En la figura se puede visualizar los valores de Sa 1.0s de 0.36s a 0.38s para el Barrio San Enrique de Velasco. Tomado del programa Qgis, por Elaboración propia.

Los modelos de la Variabilidad del movimiento del terreno son los siguientes:

Figura 29

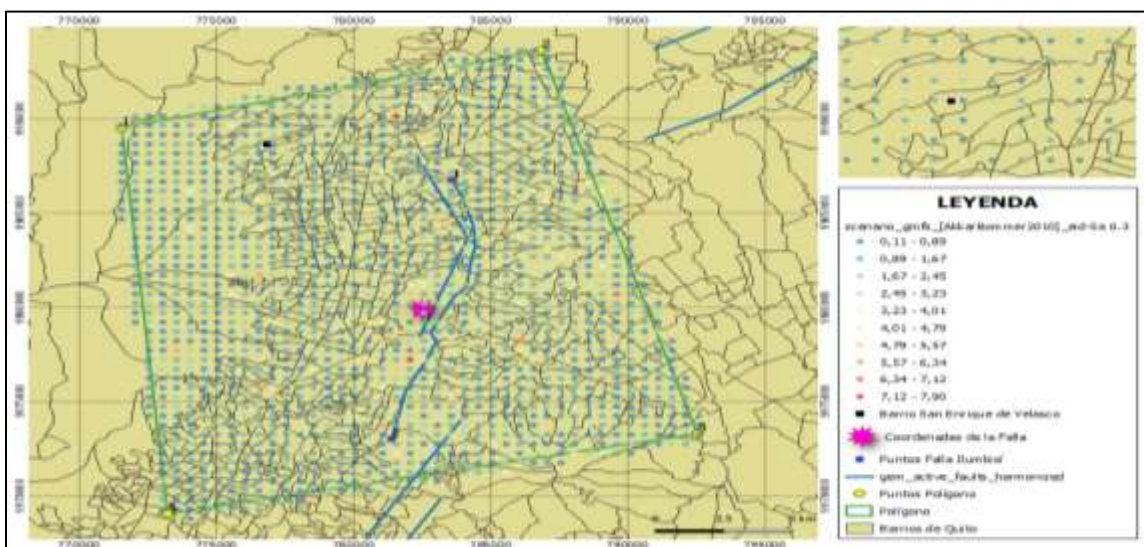
Valores de PGA en el modelo Akkar & Bommer 2010



Nota. En la figura se puede visualizar los valores de PGA de 0,16g y 0.42g, para el Barrio San Enrique de Velasco. Tomado del programa Qgis, Elaboración propia.

Figura 30

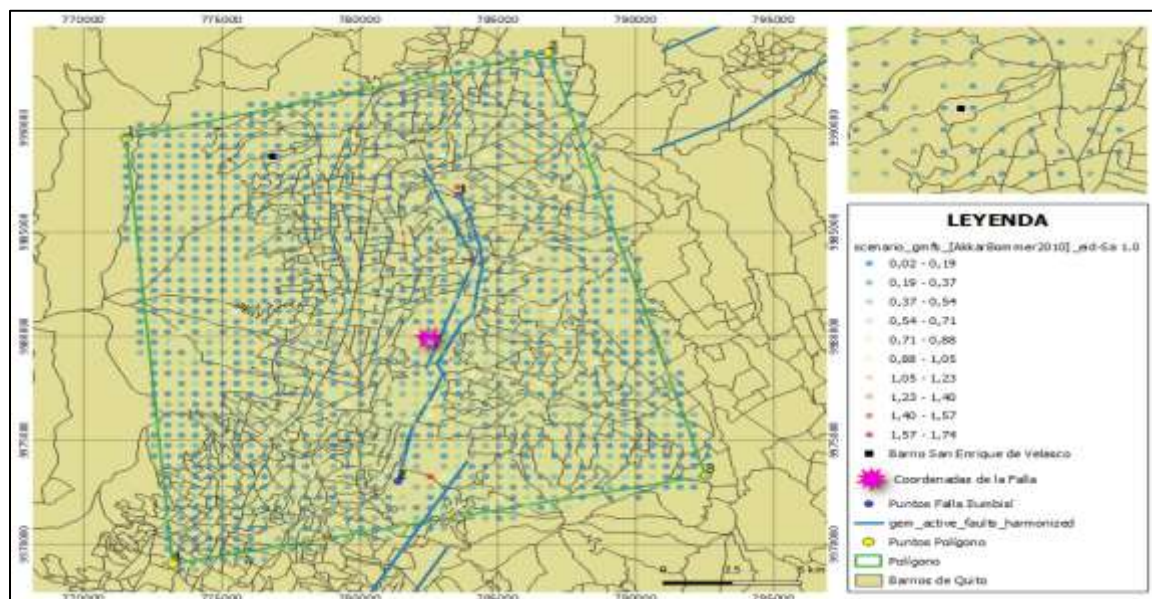
Valores de Sa 0.3 en el modelo Akkar & Bommer 2010



Nota. En la figura se puede visualizar los valores de Sa 0.3s de 0.77s y 1.53s, para el Barrio San Enrique de Velasco. Tomado del programa Qgis, Elaboración propia.

Figura 31

Valores de Sa 1.0 en el modelo Akkar & Bommer 2010

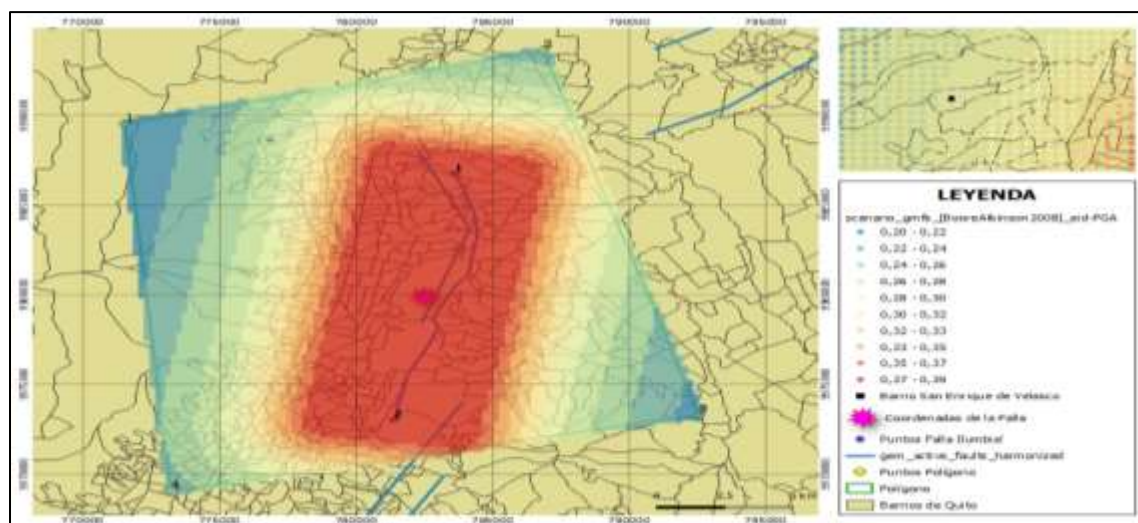


Nota. En la figura se puede visualizar los valores de Sa 1.0s de 0.13s y 0.1s para el Barrio San Enrique de Velasco. Tomado del programa Qgis, Elaboración propia.

Modelo Atkinson & Boore 2008

Figura 32

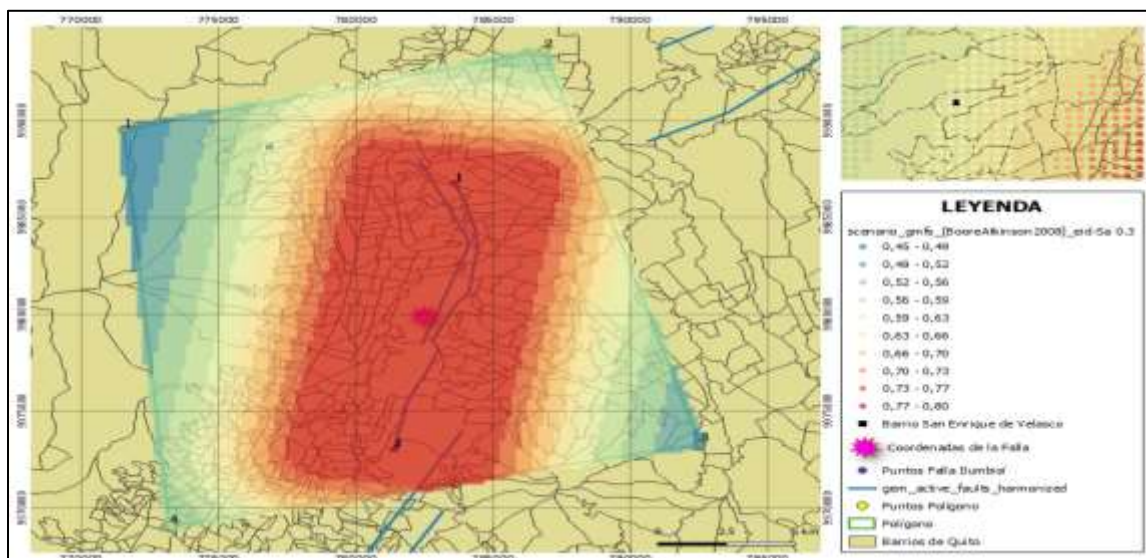
Valores de PGA para el modelo de Atkinson & Boore 2008



Nota. En la figura se puede visualizar los valores de PGA de 0.26 - 0.28g para el Barrio San Enrique de Velasco. Tomado del programa Qgis, por Elaboración propia.

Figura 33

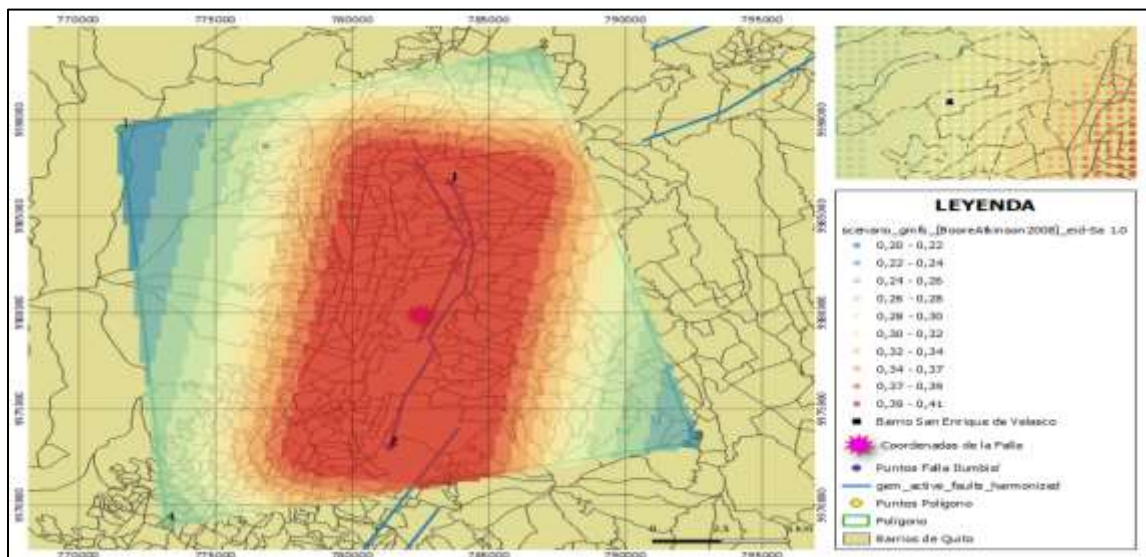
Valores de S_a 0.3s para el modelo de Atkinson & Boore 2008



Nota. En la figura se puede visualizar los valores de S_a 0.3 de 0.59s a 0.63s para el Barrio San Enrique de Velasco. Tomado del programa Qgis, por Elaboración propia

Figura 34

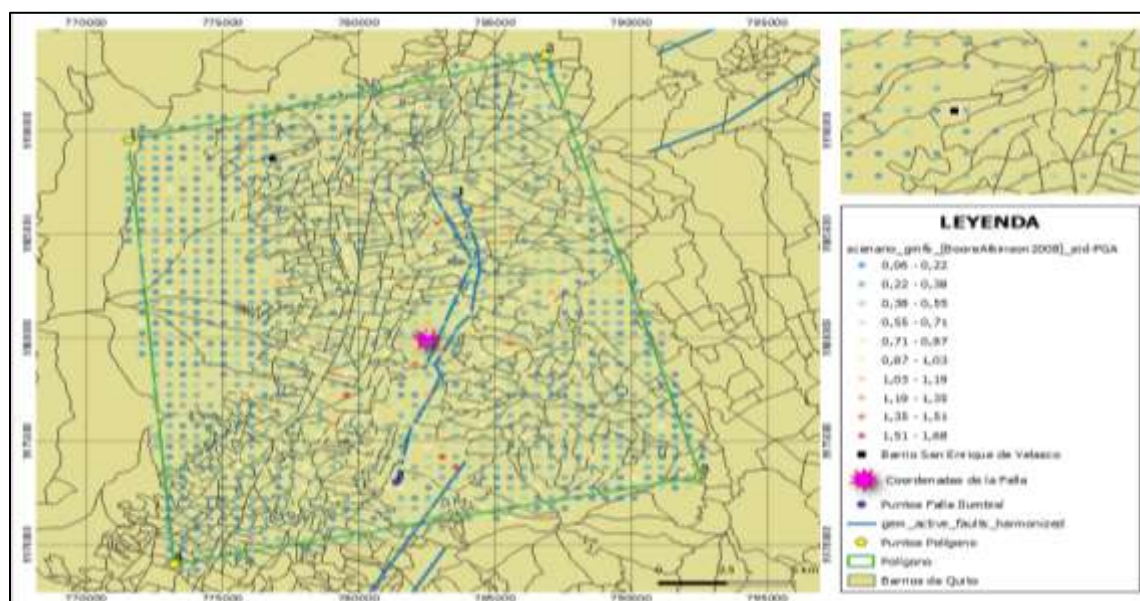
Valores S_a 1.0s para el modelo de Atkinson & Boore 2008



Nota. En la figura se puede visualizar los valores de S_a 1.0s de 0.28s a 0.30s para el Barrio San Enrique de Velasco. Tomado del programa Qgis, por Elaboración propia.

Figura 35

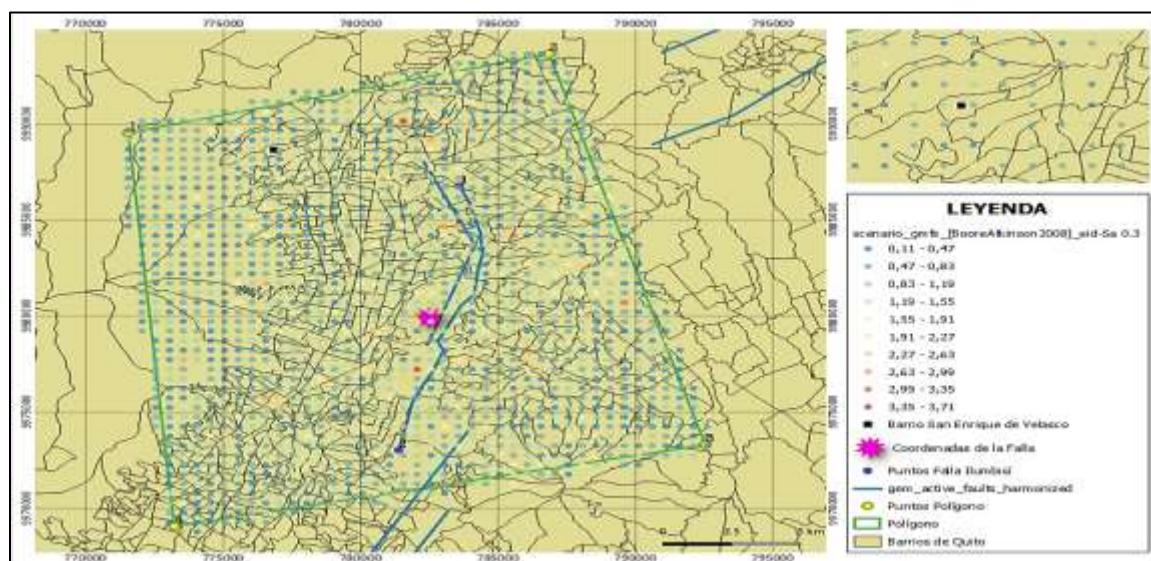
Valores de PGA para el modelo de Atkinson & Boore 2008



Nota. En la figura se puede visualizar los valores de PGA de 0.12g y 0.28g, para el Barrio San Enrique de Velasco. Tomado del programa Qgis, por Elaboración propia

Figura 36

Valores de Sa 0.3 para el modelo de Atkinson & Boore 2008



Nota. En la figura se puede visualizar los valores de Sa 0.3 de 0.52s y 0.92s, para el Barrio San Enrique de Velasco. Tomado del programa Qgis, Elaboración propia

Figura 37

Valores de Sa 1.0 para el modelo de Atkinson & Boore 2008

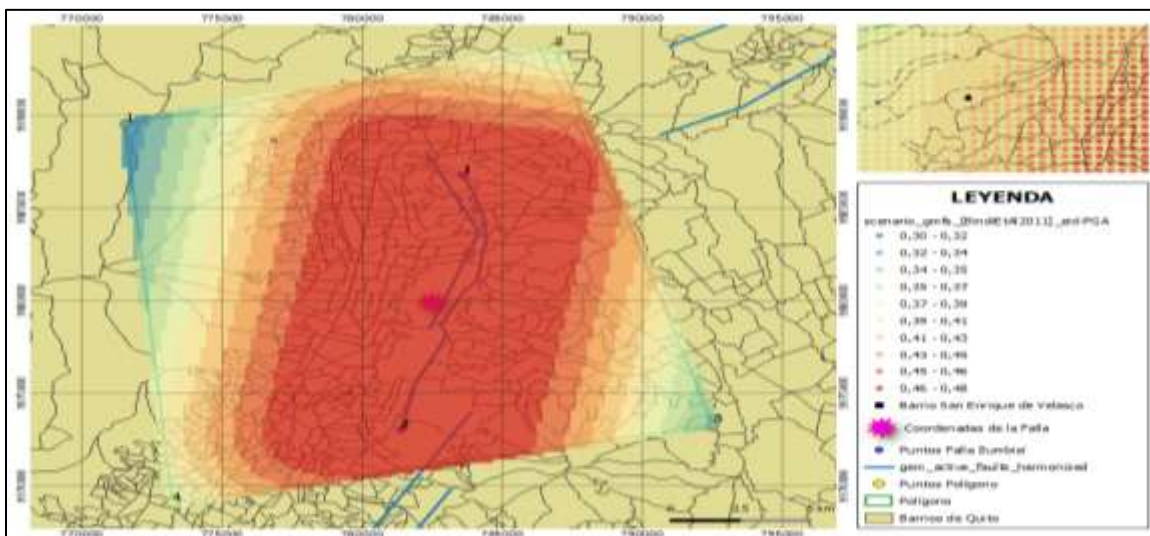


Nota. En la figura se puede visualizar los valores de Sa 1.0 de 0.09 y 0.11s, para el Barrio San Enrique de Velasco. Tomado del programa Qgis, Elaboración propia

Modelo Bindi et al 2011

Figura 38

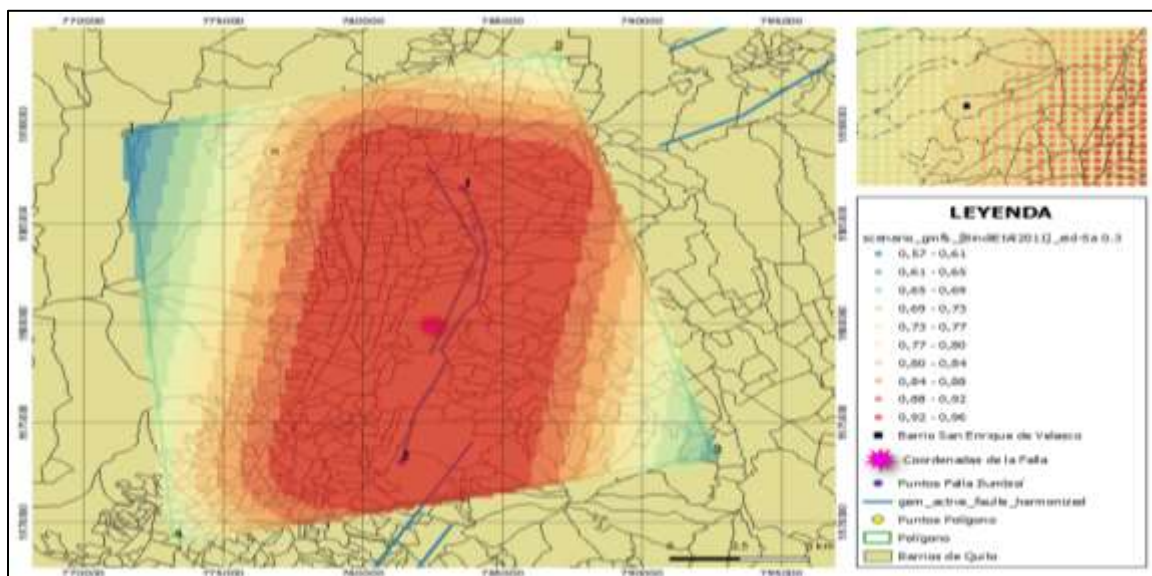
Valores de PGA para el modelo de Bindi et al 2011



Nota. En la figura se puede visualizar los valores de PGA de 0.41s a 0.45s para el Barrio San Enrique de Velasco. Tomado del programa Qgis, por Elaboración propia

Figura 39

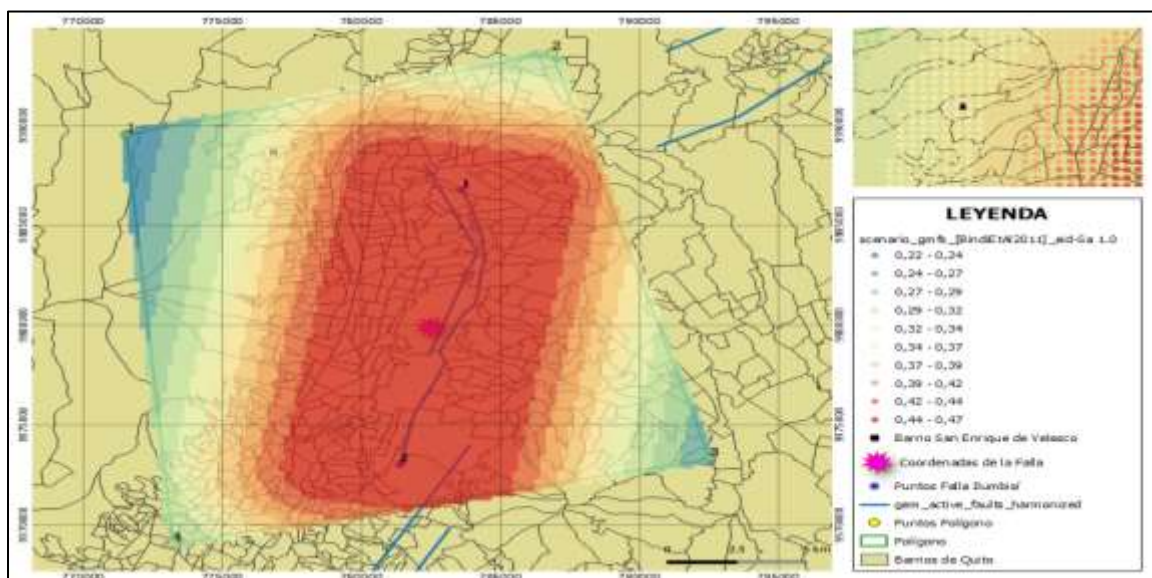
Valores de Sa 0.3 para el modelo de Bindi et al 2011



Nota. En la figura se puede visualizar los valores de Sa 0.3 de 0.80s a 0.84s para el Barrio San Enrique de Velasco. Tomado del programa Qgis, por Elaboración propia.

Figura 40

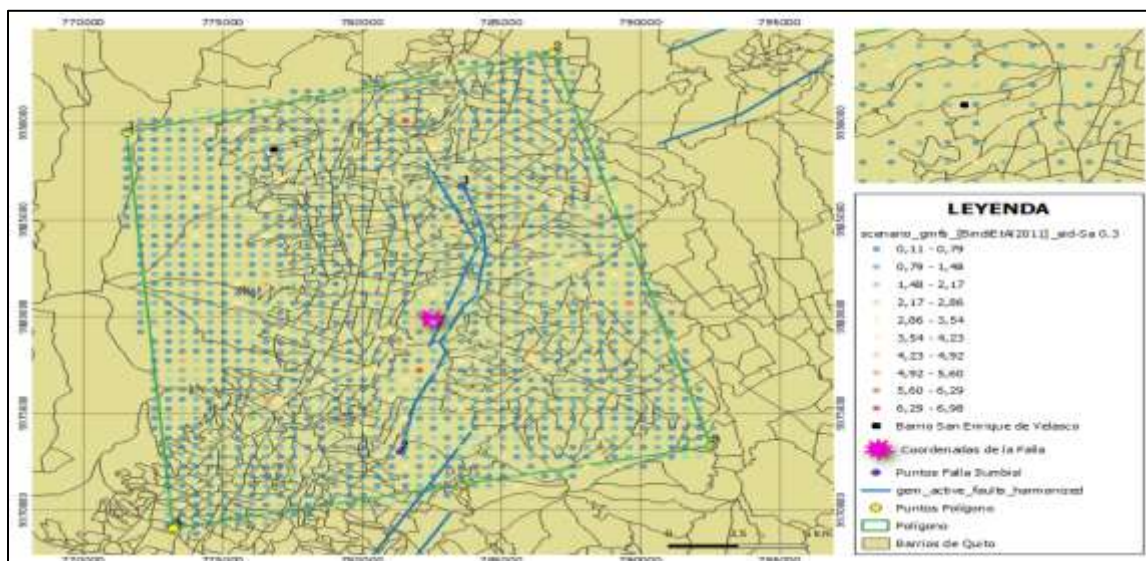
Valores de Sa 1.0 para el modelo de Bindi et al 2011



Nota. En la figura se puede visualizar los valores de Sa 1.0 de 0.34s a 0.37s para el Barrio San Enrique de Velasco. Tomado del programa Qgis, por Elaboración propia

Figura 41

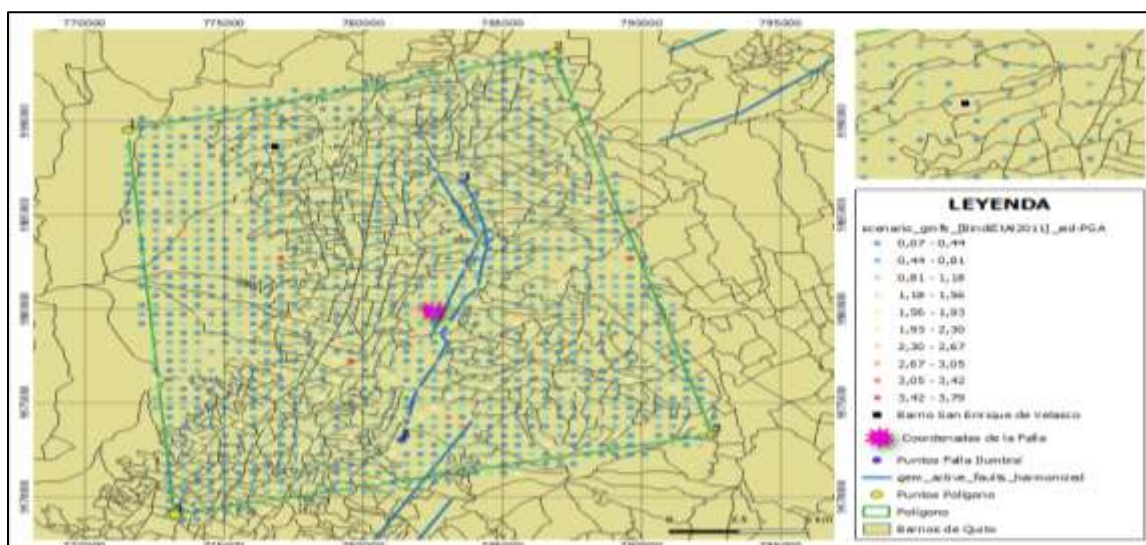
Valores PGA para el modelo de Bindi et al 2011



Nota. En la figura se puede visualizar los valores de PGA de 0.16g y 0.48g, para el Barrio San Enrique de Velasco. Tomado del programa Qgis, Elaboración propia

Figura 42

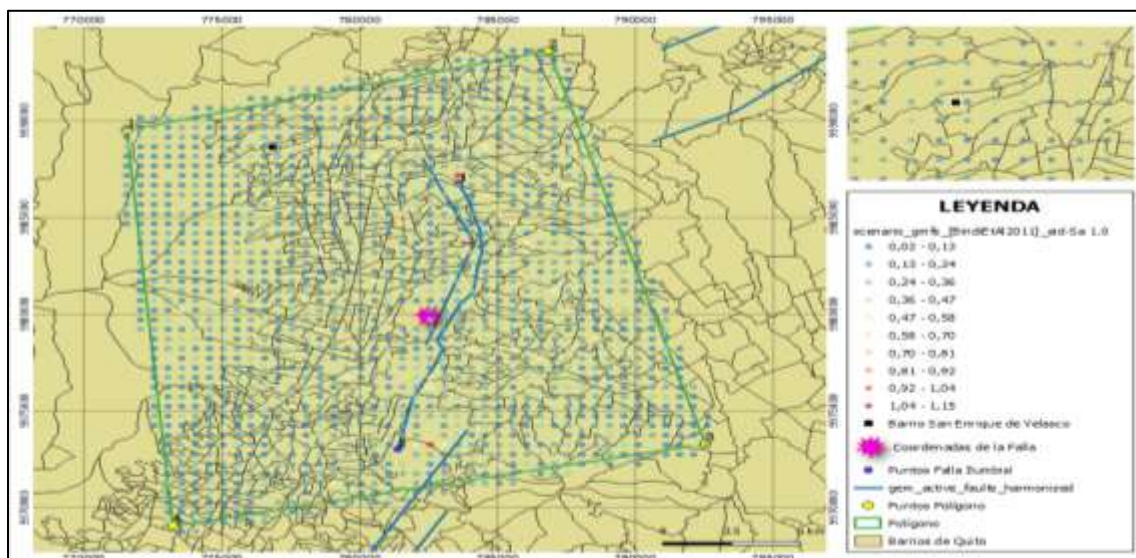
Valores de Sa 0.3 para el modelo de Bindi et al 2011



Nota. En la figura se puede visualizar los valores de Sa 0.3 de 0.70s y 1.41s para el Barrio San Enrique de Velasco. Tomado del programa Qgis, Elaboración propia

Figura 43

Valores de Sa 1.0 para el modelo de Bindi et al 2011



Nota. En la figura se puede visualizar los valores de Sa 1.0 de 0.07s y 0.09s, para el Barrio San Enrique de Velasco. Tomado del programa Qgis, Elaboración propia.

Los siguientes modelos obtenidos en variabilidades, se presentan en los anexos del presente proyecto, detallados al final del documento. A continuación, se presentará un cuadro de resultados

Tabla 18

Resultados del modelo de amenaza sísmica

| Modelo | Mediana | | | Variabilidad | | |
|-----------------------|-----------|------------|------------|--------------|------------|------------|
| | PGA (g) | Sa 0.3 (s) | Sa 1.0 (s) | PGA (g) | Sa 0.3 (s) | Sa 1.0 (s) |
| Akkar & Boomer 2010 | 0.41-0.43 | 0.88-0.99 | 0.36-0.38 | 0.16, 0.42 | 0.77, 1.53 | 0.13, 0.1 |
| Atkinson & Boore 2008 | 0.26-0.28 | 0.59-0.63 | 0.28-0.30 | 0.12, 0.28 | 0.52, 0.92 | 0.09, 0.11 |
| Bindi et al 2011 | 0.41-0.45 | 0.80-0.84 | 0.34-0.37 | 0.16, 0.48 | 0.70, 1.41 | 0.07, 0.09 |

Nota: Obtenido del programa OpenQuake y del software de información geográfica QGIS, por Elaboración propia.

Capítulo IV

Modelo de Exposición

Recopilación de datos

Un modelo de exposición puede mostrarse como un catálogo de estructuras que indican la cantidad de edificaciones de acuerdo a su tipología estructural, número de pisos, área construida y costos de reposición (Hinestroza, 2018).

Para realizar los modelos de exposición, así como para la selección de las curvas de vulnerabilidad para edificaciones residenciales del Distrito de Quito, específicamente del barrio San Enrique de Velasco, se realizó el levantamiento completo de todas las edificaciones existentes en el barrio, un total de 910 edificaciones residenciales y de uso mixto.

Nivel de resolución del modelo de exposición

El nivel de detalle de un levantamiento de información para un modelo de exposición sísmica depende de la resolución del modelo, y de la escala, cuando se hace a escala regional o de distritos o provincias, la resolución del modelo para un mejor tratamiento de datos se hace con una resolución barrial para lo cual se definen zonas homogéneas que contengan características similares, en cuanto a niveles socioeconómicos, uso del suelo y altura de edificaciones.

Para el desarrollo del trabajo de investigación presente el nivel de resolución es de construcciones individuales, cabe mencionar que es el nivel de resolución ideal

para un modelo de exposición cualquiera, sin embargo para recopilar información de toda una ciudad con un nivel de resolución a construcciones individuales se requiere de una gran inversión de tiempo y dinero, además de las dificultades en obtener información precisa ya que se carece de información de planos estructurales o memorias de cálculo, o por la dificultad de ingresar a las viviendas tanto como por privacidad como por la coyuntura actual de la pandemia mientras se realiza el proyecto. En el caso del Barrio San Enrique de Velasco el nivel de resolución de construcciones individuales es factible, y se lo ha realizado de una manera óptima, recopilando datos de la base catastral del municipio del Distrito de Quito y levantando los datos restantes de una manera eficaz a través de información remota.

Datos Catastrales

Para elaborar los modelos de exposición se requieren datos principales como, el material del cual está realizado la edificación, el número de pisos, el uso del suelo, el año de construcción, el estado de la estructura, el área del lote, así como el área de construcción.

Para esto se recurrió a las bases catastrales del Municipio de Quito que cuentan con la información actualizada hasta el año 2019, se logró obtener información cartográfica de todo el barrio San Enrique de Velasco, archivos en formato shape.(shp) tipo polígonos que contaban con la información georreferenciada de cada uno de los predios y edificaciones, así como de todo el barrio, dato importante para realizar el estudio de amenaza, y obtener métricas de daño en el estudio completo de riesgo sísmico. La información cartográfica proporcionada por la Secretaría de Planificación de Hábitat y Vivienda de Quito, se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 19

Información Cartográfica proporcionada por la Secretaría de Planificación de Hábitat y Vivienda de Quito.

| Polígono – Capa | Formato archivo | Información Georreferenciada |
|------------------------|------------------------|---|
| Access | Shape.shp | Contiene códigos catastrales e información sobre límites de terreno |
| Construcciones | Shape.shp | Contiene los polígonos de las construcciones establecidas en los predios. |
| Lotes | Shape.shp | Contiene polígonos con las divisiones de los predios de cada manzana donde se establecen las construcciones individuales. |
| Aivas | Shape.shp | Contiene polígonos con información sobre la ubicación y el tipo de construcción de acuerdo a su ubicación. |
| Área_planta | Shape.shp | Contiene los polígonos con el área en planta construida de las edificaciones. |

Nota: Elaboración Propia.

Además de los archivos shapes, también fue proporcionado un archivo de Excel, que contiene información de cada construcción individual, los datos de cada edificación construida son los siguientes, en negrilla se indican los datos de mayor relevancia para el estudio:

- **FID**
- CAT_LOTE
- **ÁREA_TERRENO**
- PROPIEDAD
- CLAVE_CATA
- OBJECTID_1
- CAT_PREDIO
- CAT_LOTE_1
- NÚMERO_PREDIO
- CAT_VIA
- CÓDIGO_AIV
- CAT_AIVA_D
- DERECHO_AC
- PORCENTAJE

- CLAVE_CAT_1
- FRENTE
- **ÁREA_TERRENO_1**
- ÁREA_CONSTR
- VALORACIÓN
- VALORACIÓN_1
- **VALORACIÓN_2**
- VALORACIÓN_3
- DENOMINACIÓN
- **USO_PRINCIPAL**
- OBJECTID_2
- **ANIO_CONSTR**
- CAT_PRED_1
- CAT_PRED_2
- **NÚMERO_PISO**
- CÓDIGO_UND
- ARMAZON
- **CUBIERTA**
- **MAMPOSTERÍA**
- **PAREDES**
- VENTANAS
- PUERTAS
- VIDRIOS
- ACABADOS
- ETAPA_CONST
- **ESTADO**
- **USO**
- **TIPO_CONST**
- ÁREA_DECLA
- ÁREA_PISO
- ÁREA_TOTAL
- VALORACIÓN_4
- PRINCIPAL
- **SHAPE LENG**
- **SHAPE AREA**

Levantamiento de Datos Complementarios

Los datos catastrales nos dan una amplia información para la elaboración de los modelos de exposición, sin embargo, los datos restantes necesarios para el estudio se levantaron individualmente a través de encuestas remotas, donde se recopiló, el tipo de material de acuerdo a la nomenclatura del GEM, el sistema de resistencia lateral, la confiabilidad del levantamiento, la ductilidad, irregularidad en planta como en elevación, número de viviendas y actualización del número de pisos.

Se levantó la información restante de manera remota a través del recorrido de las calles con la ayuda de la plataforma del Street View de Google, es una metodología planteada por Osorio (2015) y González (2017), la misma permitió el levantamiento y comprobación de los datos catastrales proporcionados y descritos en el inciso anterior, a través de la observación remota externa, sin embargo con este método se presenciaron algunas limitantes tales como el acceso u observación remota de las edificaciones que se encontraban dentro de los lotes, en el centro de las manzanas, construcciones que se encontraban cercanas a la quebrada del Barrio San Enrique de Velasco y también calles que no se encontraban en el recorrido del Street View de Google.

Debido a que la presente investigación se desarrolló durante la pandemia del Covid-19, no se contemplaba el uso de encuestas presenciales o de campo, motivo por el que se decidió levantar la información restante con la ayuda de un dron profesional, en modo de vuelo deportivo, el cual desde el mando obtener tomas y videos a una resolución de 20 Mpx, en 4k, para visualizar y caracterizar las edificaciones cuya información no se podía obtener con la metodología previa.

Figura 44

Lugar de despegue y control del dron.



Nota. Elaboración propia.

La resolución de las fotos obtenidas con el dron determina una gran importancia en la precisión y veracidad de los datos además de la eficiencia del levantamiento, para poder levantar los datos restantes y comprobar o actualizar los ya obtenidos de la base catastral.

Figura 45

Fotografía aérea Barrio San Enrique de Velasco



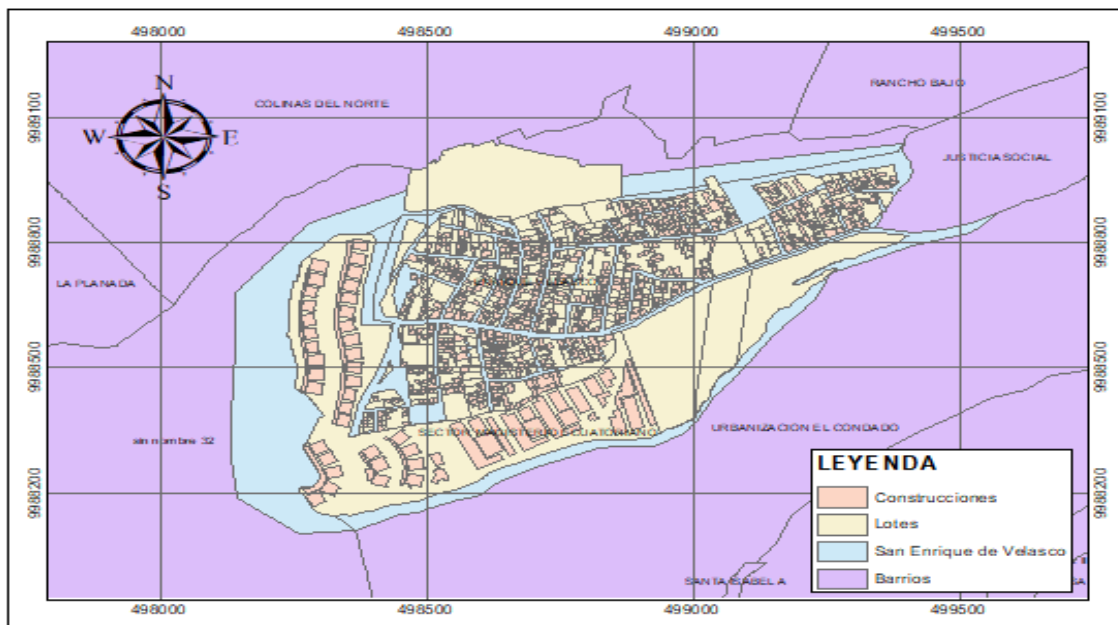
Nota: Elaboración Propia.

Se obtuvieron varias tomas desde diferentes puntos del barrio, cabe recalcar que las fotografías fueron en modo deportivo y no en plan de vuelo, ya que habían ciertas limitantes en el caso de realizar el plan de vuelo para obtener las fotografías aéreas, como tiempo de vuelo necesario para cubrir toda el área del levantamiento, y en el plan de vuelo lo que se obtienen son ortofotos, que de cierta manera dificultan identificar ciertos aspectos de las construcciones como se lo haría con las tomas en vuelo deportivo con el ángulo de inclinación necesario de acuerdo a las necesidades del proyecto y del operador.

Con las tomas necesarias y el recorrido virtual del Street View de Google, conjuntamente con la base de datos georreferenciada se procede a obtener la información restante, tomando como referencia los mapas obtenidos a partir de los archivos shapefiles, ubicando las construcciones de acuerdo a su código FID en el mapa obtenido de los datos del catastro y posteriormente ubicándolo en el Street View o en las fotografías aéreas obtenidas por el dron.

Figura 46

Mapa de Ubicación de las construcciones y predios del Barrio San Enrique de Velasco



Nota: En el mapa se muestra el Barrio San Enrique de Velasco con sus barrios limítrofes en color morado y sus construcciones. Tomado de Arcgis, por Elaboración Propia.

Ductilidad

La ductilidad es una propiedad de los materiales de su capacidad de deformarse plásticamente ante la acción de las fuerzas sin presentar daño. En elementos estructurales hace referencia a la capacidad de los elementos de sufrir deformaciones plásticas sin perder su resistencia (Nakano, 1995)

En los estudios para los modelos de exposición se define la ductilidad como un parámetro que visualmente determine si una construcción tiene un diseño técnico estructural y constructivo, se identifica a una estructura como dúctil si se determina que tiene un diseño y proceso de construcción ingenieril, y como no dúctil a las edificaciones que no cumplan con este parámetro (Chicaiza, 2017).

Para clasificar una estructura como dúctil o no dúctil se toma en cuenta ciertos parámetros como el estado de la estructura, su mantenimiento, el año de construcción todos estos parámetros quedan a criterio ingenieril de los autores quienes han desarrollado el presente estudio, tomando en cuenta que al ser un levantamiento visual no se toman datos específicos para determinar la ductilidad de la estructura de manera rigurosa. También se considera que, para asignar la característica de ductilidad a una estructura, el número de pisos ya que en construcciones superiores a los 4 pisos la probabilidad de que hayan sido ejecutadas con un diseño técnico y un proceso constructivo profesional es más alta.

Resultados de los levantamientos

Las edificaciones tomadas en cuenta para el modelo de exposición son solo de tipo residencial o de uso mixto para poder relacionarlas tanto con la base de datos catastrales y con los censos de vivienda del INEC, en el caso del Barrio San Enrique de Velasco todas las edificaciones son de uso residencial y mixto, y se excluyen 4 edificaciones de uso esencial que pertenecen a tipo de uso educacional, las mismas son aulas y auditorio del colegio María Angélica Idrobo. Se excluye el tipo de estructuras de uso esencial ya que la NEC indica el incremento de la intensidad sísmica para su diseño, por lo que se deduce que tienen una mayor capacidad para soportar sismos a diferencia de las edificaciones de uso residencial y mixto.

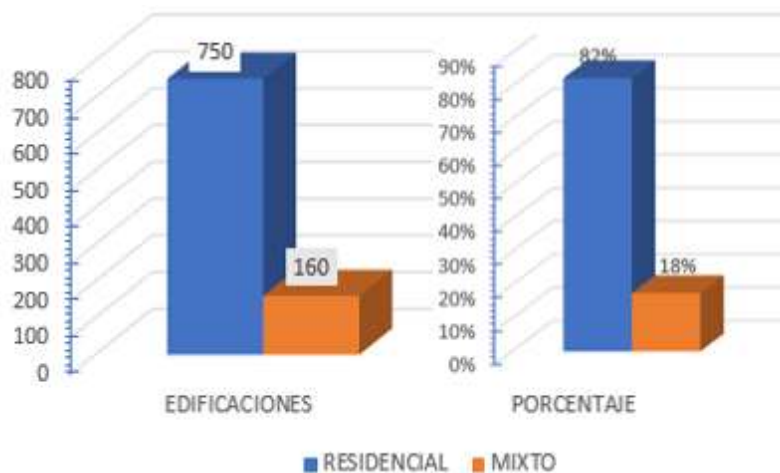
Se muestran a continuación los resultados y estadísticas obtenidos tanto de los datos de la base catastral como del levantamiento de información remota. En la figura 47 se muestra la totalidad de estructuras en porcentaje y número de acuerdo a su uso ocupacional. Es importante recalcar que en la base catastral de acuerdo a su uso lo clasifica de la siguiente manera:

- Casa
- Departamento
- Parqueadero descubierto mixto con acabado
- Casa/Patio/Jardín Abierto TIERRA
- Parqueadero descubierto con acabado
- Bodega/Garaje

Al realizar el levantamiento en el listado las edificaciones clasificadas como parqueadero y bodega, pertenecían a uso residencial y uso mixto, por lo que a las edificaciones clasificadas como casa y departamento las asignamos a uso residencial y las restantes a uso mixto, no influye en los resultados finales del estudio de riesgo sísmico, es netamente informativo.

Figura 47

Porcentaje y cantidad de edificaciones de acuerdo a su ocupación.



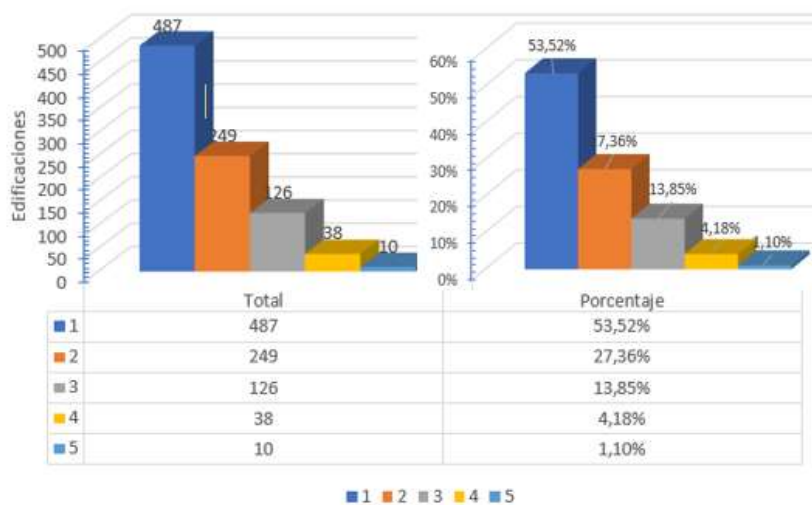
Nota: Se muestra las estadísticas de los usos de las edificaciones del Barrio San Enrique de Velasco, por Elaboración Propia

En la figura anterior se observa que el mayor porcentaje de edificaciones corresponde a uso residencial, con un 82% en total y el uso u ocupación del tipo mixto con el 18%, que corresponde a uso residencial, combinado con uso comercial o industrial.

En la figura 48 se muestra la cantidad de edificaciones por la altura de pisos, el mayor porcentaje de edificaciones con un 53,52% poseen 1 piso de altura, seguido con un 27% y 14% correspondientemente a las edificaciones de 2 y 3 pisos, y con un porcentaje minoritario de 4,18% y 1,10% las estructuras de 4 y 5 respectivamente, cabe recalcar que estas en su mayoría correspondían a las edificaciones residenciales del magisterio realizadas por el gobierno, también la altura de las edificaciones mayoritariamente de 1 piso, reflejan el estrato socioeconómico del sector.

Figura 48

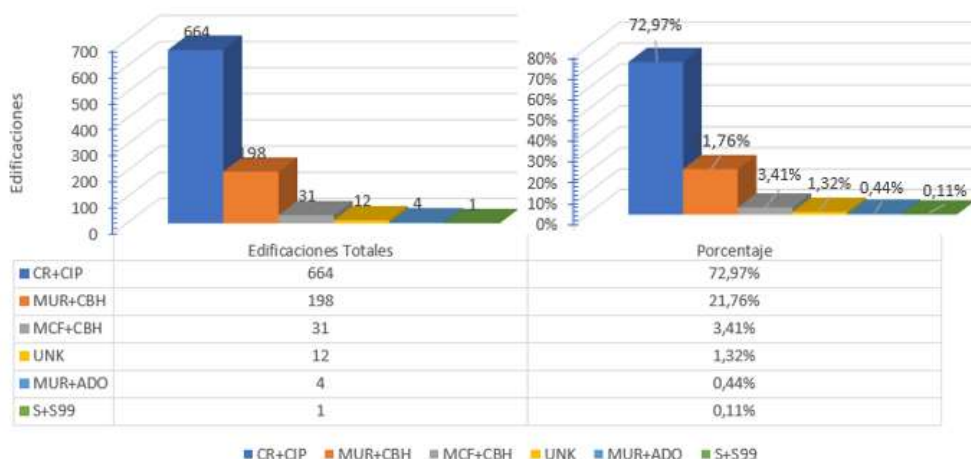
Cantidad y porcentajes de edificaciones por altura de pisos.



Nota: En la figura se muestra un gráfico de barras y una tabla el número total de edificaciones de acuerdo a su número de pisos, por Elaboración propia.

Figura 49

Cantidad y porcentaje de edificaciones por tipo de material



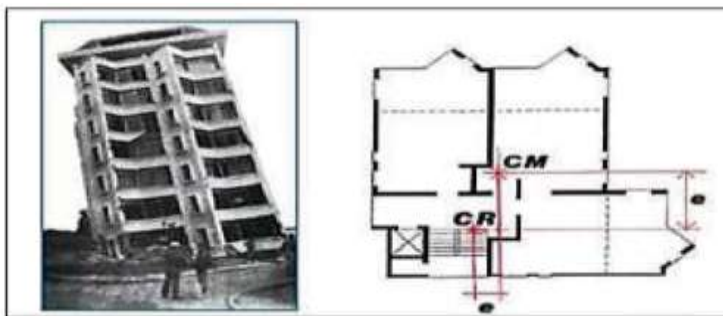
Nota: Se muestra la cantidad de edificaciones y su porcentaje de acuerdo al material, por Elaboración Propia.

En la figura 49 se muestra la distribución en cantidad numérica y porcentaje de los materiales utilizando la simbología propuesta del GEM. El material predominante en las edificaciones es el concreto u hormigón armado en sitio, el mayor porcentaje con el 72,97% de edificaciones corresponden a esta tipología estructural seguido de la mampostería no reforzada en bloque de hormigón con un 21,76%. Cabe recalcar que esta estadística es para el modelo de exposición más probable.

Se muestran a continuación los resultados de las estructuras de acuerdo a sus irregularidades estructurales. En una estructura se determina irregularidad en planta y en elevación, en la irregularidad en planta tenemos tres tipos de irregularidad de acuerdo al GEM, la torsión en planta que se da cuando la localización del centro de rigidez no coincide con el centro de masas, como se muestra en la figura 50.

Figura 50

Edificio con Irregularidad Torsional en Planta

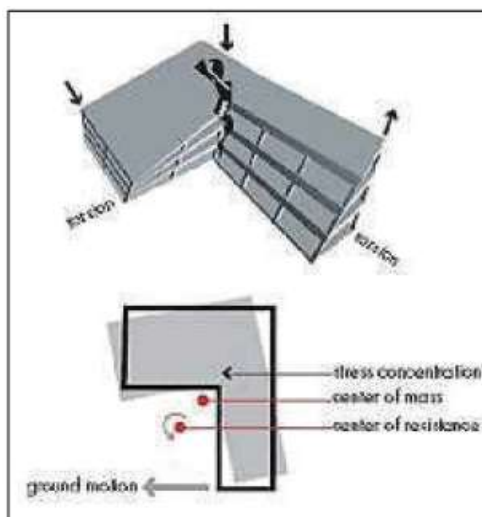


Nota: Se observa que el centro de rigidez no coincide con el centro de masa se presenta irregularidad torsional. Tomado de (Brzev et al., 2013).

Otra irregularidad en planta que define el GEM también como patología es la esquina reentrante, la cual se presenta en edificaciones cuya forma en planta sea tipo, “L”, “U”, “E”. Un movimiento sísmico produce grandes esfuerzos cortantes en los diafragmas de losa como se indica en la figura 51.

Figura 51

Irregularidad en planta de tipo esquina reentrante.



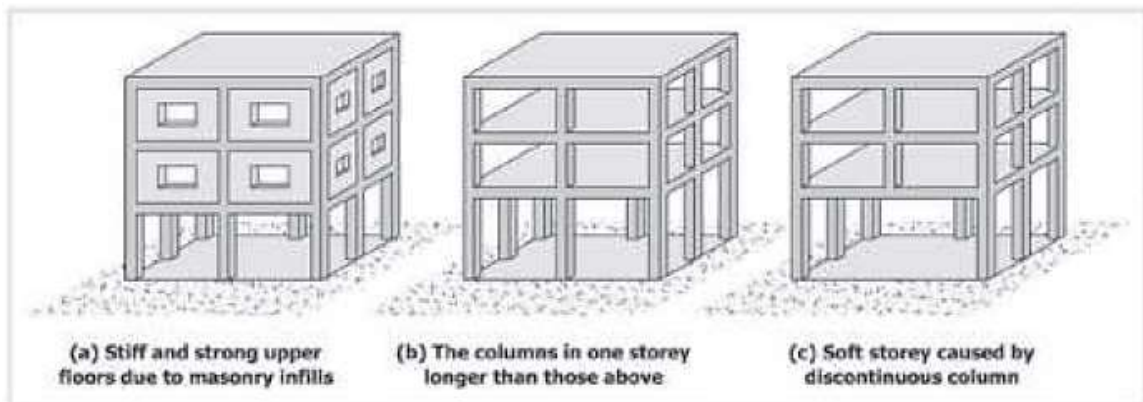
Nota: En la figura se indica a más de las irregularidades torsionales gráficamente la patología de la esquina reentrante. Tomado de (Brzev et al., 2013).

Otros tipos de irregularidad en edificaciones incluidas también incluyen losas discontinuas, generalmente muy comunes utilizadas con fines arquitectónicos, las cuales también desplazan el centro de rigidez y el centro de masas.

En cuanto a irregularidades verticales, el mayor porcentaje de edificaciones no presentan irregularidades visibles, sin embargo, en las estructuras inspeccionadas, se observa irregularidades como pisos blandos, columna corta, martilleo, y cambios bruscos en elevación. Se presenta en la figura 52 y 53 ejemplos de piso blando e irregularidad en elevación.

Figura 52

Estructura con Pisos blandos.



Nota: a) Pisos superiores rígidos y fuertes debido a la mampostería de relleno. b) Columnas en un piso más largas que las superiores. c) Piso blando por columnas discontinuas. Tomado de (Brzev et al., 2013).

Figura 53

Estructuras con Irregularidad y cambios en elevación



Nota: Obtenida de (Google Street View Map, 2020)

Otra de las patologías e irregularidades observadas en las estructuras del levantamiento son columna corta y el martilleo que se produce cuando no hay la separación suficiente entre dos edificaciones y que, ante un eventual sismo, podrían golpearse y dañarse. El martilleo puede presentarse cuando la separación es menor al 4% de la edificación de la altura de menor elevación. En la figura 54 se muestran algunos ejemplos.

Figura 54

Edificaciones en las que se produce martilleo.



Nota: En las edificaciones de las fotografías no existe la separación suficiente para evitar un daño estructural por martilleo en caso de sismo, por Elaboración Propia.

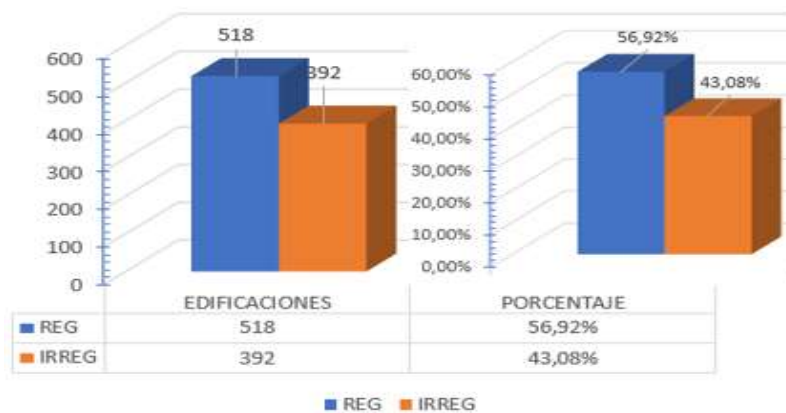
El porcentaje de estructuras regulares e irregulares en edificación es similar con el 57% y 43% respectivamente. Dentro de las estructuras irregulares en planta se evidenciaron todas las irregularidades y patologías descritas anteriormente, entre ellas la principal que presentan al menos todas las estructuras irregulares, la irregularidad torsional, esquina reentrante, losa discontinua.

El mayor porcentaje de edificaciones corresponde a estructuras regulares, uno de los problemas más comunes es el de martilleo, el número de estructuras irregulares en elevación corresponde a una minoría del 19,23%, siendo la mayoría restante estructuras regulares.

En las figuras 55 y 56 se indica el porcentaje y cantidad de edificaciones con irregularidad en planta y en elevación.

Figura 55

Porcentaje de estructuras Regulares e Irregulares en planta.

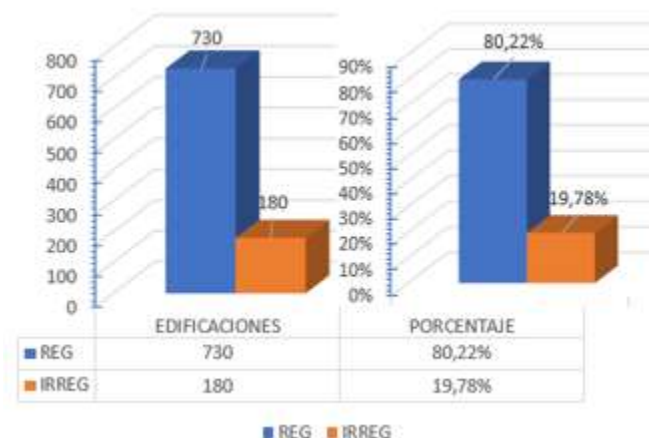


Nota: Se muestra la cantidad de edificaciones regulares e irregulares en planta, por

Elaboración propia.

Figura 56

Porcentaje y cantidad de edificaciones regulares e irregulares en elevación.

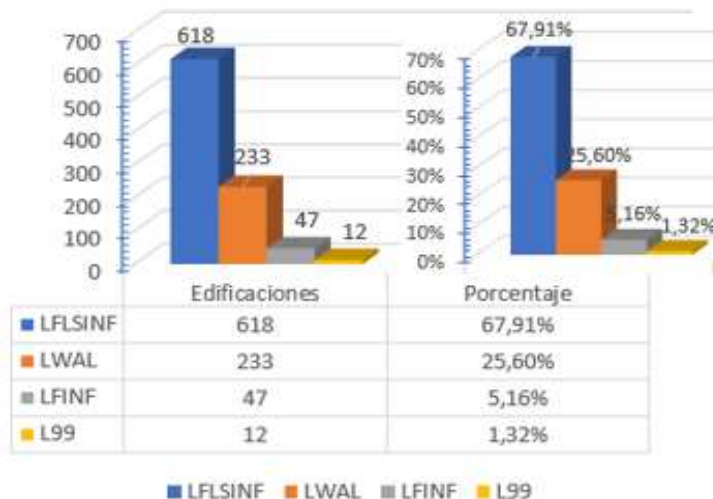


Nota: En la figura se indica el porcentaje de edificaciones irregulares y regulares en elevación, por Elaboración Propia.

En el modelo de exposición más probable el sistema de resistencia a cargas laterales que predomina es el sistema de pórticos rellenos con paredes de mampostería y losa plana alivianada o maciza, de acuerdo a la nomenclatura del GEM denominado LFLSINF, abarca más de la mitad del total con un 67,91%, es el sistema estructural predominante no solo en el Barrio San Enrique de Velasco, sino en la ciudad de Quito, le sigue con un porcentaje del 25,60% el sistema de resistencia lateral de muros, que se le atribuye mayoritariamente a las edificaciones de mampostería y adobe. Después encontramos el sistema de resistencia lateral de pórticos rellenos con paredes de mampostería, diferenciándose del sistema predominante por sus vigas de mayor peralte, sin vigas banda. Finalmente, un 1,32% corresponde a sistema de resistencia lateral desconocido, todas las edificaciones de esta clasificación son extremadamente informales.

Figura 57

Cantidad y Porcentaje de Edificaciones de acuerdo a su sistema de resistencia de cargas laterales (SRCL)



Nota: Se visualiza las cantidades con sus respectivos porcentajes de las edificaciones de acuerdo al SRCL, por Elaboración propia.

Tipología Estructural

Al combinar las características y propiedades descritas en este capítulo, el tipo de material con su tecnología de construcción, el sistema de resistencia a carga lateral, y el número de pisos con la nomenclatura propuesta por el GEM, se obtienen las tipologías estructurales, con el orden que se describe a continuación:

- Material y tecnología de construcción
 - CR+CIP (Concrete reinforced with cast in place – Concreto reforzado vaciado en sitio)
- Sistema de resistencia a cargas laterales
 - LFLINF (Infilled frame – Pórticos rellenos con paredes de mampostería)

- Ductilidad
 - DUC (Ductile – Dúctil)
- Altura en número de pisos exacto o rango de número de pisos
 - HEX2 o HBET: 1,2

Para el caso descrito la tipología quedaría de acuerdo a la siguiente expresión:

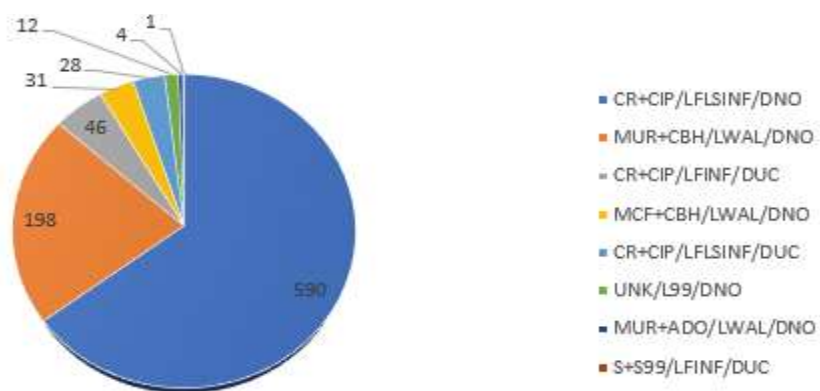
CR+CIP/LFLINF/DUC/HEX2

La tipología hace referencia a una edificación de concreto reforzado vaciado en sitio, con un sistema de resistencia a cargas laterales de pórticos rellenos con paredes de mampostería, dúctil con una altura de 2 pisos.

En el Barrio San Enrique de Velasco se pudo registrar un total de 20 tipologías incluido el número de pisos y un total de 8 tipologías generales, en la figura 58 y 59 se muestran respectivamente la cantidad y porcentaje de cada tipología estructural.

Figura 58

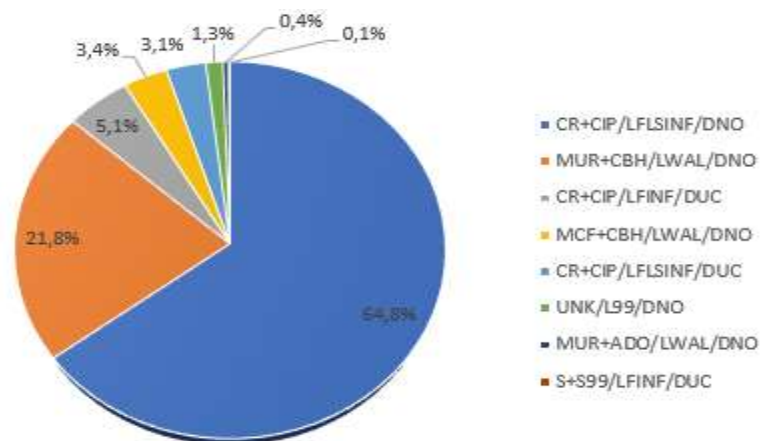
Cantidad de edificaciones de acuerdo a cada tipología estructural



Nota: En la figura se muestra la cantidad de edificaciones de acuerdo a cada tipología estructural, por Elaboración Propia.

Figura 59

Porcentaje de edificaciones de acuerdo a su tipología estructural



Nota: Se muestra el porcentaje de edificaciones de acuerdo a su tipología estructural, por Elaboración Propia.

En la figura 59 se presenta el porcentaje de edificaciones correspondientes a cada tipología estructural, la tipología con mayor porcentaje presente en el barrio con un 64,8% es CR+CIP/ LFLSINF/ DNO, es decir las edificaciones realizadas en Concreto reforzado u hormigón armado con sistema de resistencia lateral de cargas, relleno en mampostería con losa alivianada o maciza no dúctil, con construcciones de 1 hasta 4 pisos.

En la tabla 20 y 21 se muestra el número de edificaciones de acuerdo a su tipología estructural y su número de pisos:

Tabla 20

Cantidad de edificaciones de acuerdo a su tipología estructural y número de pisos.

| Material + tecnología/Sistema/Ductilidad | #EDIFICIOS | ALTURA (PISOS) | | | | |
|---|------------|----------------|-----|-----|----|----|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| CR+CIP/LFLSINF/DNO | 590 | 267 | 201 | 110 | 12 | 0 |
| MUR+CBH/LWAL/DNO | 198 | 177 | 21 | 0 | 0 | 0 |
| CR+CIP/LFINF/DUC | 46 | 0 | 9 | 6 | 21 | 10 |
| MCF+CBH/LWAL/DNO | 31 | 25 | 5 | 1 | 0 | 0 |
| CR+CIP/LFLSINF/DUC | 28 | 1 | 13 | 9 | 5 | 0 |
| UNK/L99/DNO | 12 | 12 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| MUR+ADO/LWAL/DNO | 4 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| S+S99/LFINF/DUC | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Nota: Por Elaboración Propia.

Tabla 21

Distribución porcentual de edificaciones de acuerdo al número de pisos de cada tipología estructural.

| Material + tecnología/Sistema/Ductilidad | #EDIFICIOS | ALTURA (PISOS) | | | | |
|---|------------|----------------|-----|-----|-----|-----|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| CR+CIP/LFLSINF/DNO | 590 | 45% | 34% | 19% | 2% | 0% |
| MUR+CBH/LWAL/DNO | 198 | 89% | 11% | 0% | 0% | 0% |
| CR+CIP/LFINF/DUC | 46 | 0% | 20% | 13% | 46% | 22% |
| MCF+CBH/LWAL/DNO | 31 | 81% | 16% | 3% | 0% | 0% |
| CR+CIP/LFLSINF/DUC | 28 | 4% | 46% | 32% | 18% | 0% |
| UNK/L99/DNO | 12 | 100% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| MUR+ADO/LWAL/DNO | 4 | 100% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| S+S99/LFINF/DUC | 1 | 100% | 0% | 0% | 0% | 0% |

Nota: En la tabla se muestra el porcentaje de edificaciones de acuerdo al número de pisos de cada tipología estructural general, por elaboración propia.

En la tabla 22 se muestran la distribución de tipologías específicas encontradas en el Barrio San Enrique de Velasco, en número y porcentaje de cada una.

Tabla 22

Distribución de tipologías estructurales del Barrio San Enrique de Velasco

| N° | TIPOLOGÍAS ESTRUCTURALES | EDIFICACIONES | PORCENTAJE |
|----|--------------------------|---------------|------------|
| 1 | CR+CIP/LFLSINF/DNO/HEX:1 | 267 | 29,34% |
| 2 | CR+CIP/LFLSINF/DNO/HEX:2 | 201 | 22,09% |
| 3 | MUR+CBH/LWAL/DNO/HEX:1 | 177 | 19,45% |
| 4 | CR+CIP/LFLSINF/DNO/HEX:3 | 110 | 12,09% |
| 5 | MCF+CBH/LWAL/DNO/HEX:1 | 25 | 2,75% |
| 6 | CR+CIP/LFINF/DUC/HEX:4 | 21 | 2,31% |
| 7 | MUR+CBH/LWAL/DNO/HEX:2 | 21 | 2,31% |
| 8 | CR+CIP/LFLSINF/DUC/HEX:2 | 13 | 1,43% |
| 9 | CR+CIP/LFLSINF/DNO/HEX:4 | 12 | 1,32% |
| 10 | UNK/L99/DNO/HEX:1 | 12 | 1,32% |
| 11 | CR+CIP/LFINF/DUC/HEX:5 | 10 | 1,10% |
| 12 | CR+CIP/LFINF/DUC/HEX:2 | 9 | 0,99% |
| 13 | CR+CIP/LFLSINF/DUC/HEX:3 | 9 | 0,99% |
| 14 | CR+CIP/LFINF/DUC/HEX:3 | 6 | 0,66% |
| 15 | CR+CIP/LFLSINF/DUC/HEX:4 | 5 | 0,55% |
| 16 | MCF+CBH/LWAL/DNO/HEX:2 | 5 | 0,55% |
| 17 | MUR+ADO/LWAL/DNO/HEX:1 | 4 | 0,44% |
| 18 | CR+CIP/LFLSINF/DUC/HEX:1 | 1 | 0,11% |
| 19 | MCF+CBH/LWAL/DNO/HEX:3 | 1 | 0,11% |
| 20 | S+S99/LFINF/DUC/HEX:1 | 1 | 0,11% |

Nota: Se muestra la cantidad y el porcentaje de edificaciones de cada tipología estructural encontrada en el Barrio San Enrique de Velasco, por Elaboración Propia.

Tipologías Hormigón Armado o Concreto reforzado

Son las tipologías más comunes en el sector de estudio, se muestran las tipologías identificadas en el sector de estudio de acuerdo a la nomenclatura de las taxonomías manejadas por el GEM.

Hormigón Armado o concreto reforzado hecho en sitio, con mampostería de relleno y losa plana alivianada o maciza, no dúctil.

Estas edificaciones proceden en su mayoría de la construcción informal, se caracterizan por su sistema de pórticos rellenos de mampostería de bloque o ladrillo, y la fundición monolítica de viga y losa, donde el peralte de las vigas es el mismo de la losa, se les denomina también vigas banda, en el Barrio San Enrique de Velasco existe un total de 590 edificaciones correspondientes al 64,8% del total.

Tipología: CR+CIP / LFLSINF / DNO

Figura 60

Tipología de Concreto reforzado hecho en sitio con relleno en mampostería de bloque, no dúctil.



Nota: Obtenido de (Google Street View Map, 2020).

Hormigón Armado o concreto reforzado hecho en sitio, con mampostería de relleno y losa plana alivianada o maciza, dúctil.

Esta tipología estructural corresponde al 3,1% de edificaciones del Barrio San Enrique de Velasco, un total de 28 edificaciones, su sistema de resistencia lateral a cargas está conformado por vigas embebidas y relleno de mampostería de bloque o ladrillo, es muy probable la presencia de un profesional en la ejecución de su obra, y se caracteriza por rasgos arquitectónicos más estéticos.

Tipología: CR+CIP / LFLSINF / DUC

Figura 61

Estructura de hormigón armado o concreto reforzado hecho en sitio, con pórticos rellenos de mampostería y losa plana, dúctil.



Nota: Obtenido de (Google Street View Map, 2020).

Hormigón Armado o Concreto reforzado hecho en sitio, con mampostería de relleno en pórticos con vigas descolgadas, dúctil.

Este tipo de estructuras, generalmente corresponde a construcción formal, bajo la supervisión de profesionales en el área constructiva, en el barrio San Enrique de Velasco el porcentaje de estructuras de esta tipología es de 5,1%, 46 edificaciones en total, la mayoría corresponden a las edificaciones del Magisterio Ecuatoriano, ejecutadas por el Estado, son de tipo residencial.

Tipología: CR+CIP / LFINF / DUC

Figura 62

Estructuras de concreto reforzado hecho en sitio con mampostería de relleno, y sistema de pórticos con vigas descolgadas, dúctil.



Nota: Fotografía propia obtenida con dron profesional en vuelo modo deportivo, por elaboración propia.

Tipologías de Mampostería

En las tipologías de mampostería se identifican estructuras de mampostería no reforzada y mampostería confinada, que pueden componerse de bloque de hormigón, ladrillo o adobe. No superan los 2 pisos de altura, y es común que la cubierta o el techo sea de zinc, o asbesto cemento.

Mampostería no reforzada de bloque hueco de hormigón o ladrillo, no dúctil.

Es la segunda tipología más común en el sector de estudio, con un total de 198 edificaciones correspondientes al 21,8%, su sistema resistente a cargas laterales se les

atribuye a los muros conformados por la mampostería, no presentan comportamiento dúctil, son mayoritariamente de elaboración informal.

Tipología: MUR+CBH / LWAL / DNO

Figura 63

Estructura de mampostería no reforzada, no dúctil.



Nota: Obtenido de (Google Street View Map, 2020).

Mampostería no reforzada de adobe, no dúctil.

Corresponden a estructuras antiguas, las identificadas en el sector de estudio, todas poseen una altura de 1 solo piso, y su cubierta, puede ser de zinc o teja, su comportamiento esperado dado criterios como el año de construcción, y sus parámetros informales de elaboración la convierten en una estructura no dúctil, se identifican solo 4 edificaciones con mampostería de adobe en el sector de estudio correspondiente a un 0,4%.

Tipología: MUR+ADO / LWAL / DNO

Figura 64

Estructura en mampostería de adobe, no dúctil.



Nota: Obtenido de (Google Street View Map, 2020).

Mampostería confinada en bloque o ladrillo, no dúctil

Esta tipología estructural, por lo general son de un piso, y su cubierta predomina el zinc o el asbesto cemento, su proceso constructivo como se mencionó en el capítulo dos consiste en la construcción de paredes o muros de mampostería, y el vaciado de columnas de hormigón que actúan como los elementos confinantes, representan el 3,4% de edificaciones del barrio, un total de 31 estructuras.

Tipología: MCF+CBH / LWAL / DNO o MCF+CBLRS / LWAL / DNO

Figura 65

Estructura de mampostería confinada, no dúctil.



Nota: Obtenido de (Google Street View Map, 2020).

Tipología de Acero

En el sector de estudio, solo se visualizó una estructura en acero, correspondiente al 0,1%, pocas edificaciones se componen de elementos de acero como escaleras, vigas o puntales, pero su sistema predominante es el pórtico de hormigón armado, o concreto reforzado, las estructuras de acero pueden conformarse por acero frío o laminado en caliente, es un dato que puede generar imprecisión por la dificultad de definirlo por lo que se lo clasifica como acero desconocido con su nomenclatura S99.

Tipología: S+S99/LFINF/DUC

Tipología o sistema desconocido

Se identificaron 12 de este tipo de estructuras que no se incluyen en una clasificación formal, por lo que se les atribuye como un sistema desconocido (UNK). Su construcción es informal, o pertenecen a edificaciones muy antiguas, de un estrato

socioeconómico bajo o clase social en condición de pobreza o indigencia. Se la clasifica como no dúctil, ya que su construcción no ha sido realizada bajo parámetros ingenieriles o supervisión de un profesional.

Tipología: UNK / L99 / DNO

Figura 66

Estructura con un sistema de resistencia lateral desconocido, no dúctil.



Nota: Obtenido de (Google Street View Map, 2020).

Costos de reposición

Para determinar el costo de reposición, se recurrió a la metodología propuesta por el Municipio de Quito en la Ordenanza No. 0196 en la cual no se utiliza el valor del terreno. En el informe No. IC-O-2017-282 e IC-O 2017-289, emitido por la Comisión de Uso de Suelo el 19 de diciembre de 2017 se expide: “ORDENANZA METROPOLITANA DE APROBACIÓN DEL PLANO DEL VALOR DE LA TIERRA DE LOS PREDIOS URBANOS Y RURALES DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO, MEDIANTE LA APLICACIÓN DE LOS ELEMENTOS DE VALOR DE SUELO, VALOR DE LAS EDIFICACIONES Y VALOR DE REPOSICIÓN Y QUE REGIRÁN PARA EL BIENIO 2018-2019” (Ordenanza Metropolitano No. 0196 Municipio de Quito, 2017).

Esta sustituye la Ordenanza No. 093 del 2015, la cual fue desarrollada en la investigación de Chicaiza (2017), resultados que servirán de aporte para el desarrollo de esta investigación.

La sección III, parágrafo de la ordenanza No. 0196 indica el método de valoración de 4 tipos de construcciones:

- Cubiertas
- Abierta
- Especiales
- Adicionales constructivos e instalaciones especiales

Las construcciones cubiertas son aquellas unidades que contienen tipologías constructivas como ladrillo/ bloque, hormigón armado y otros tipos de estructuras las cuales corresponden a las edificaciones de nuestro estudio y con la utilización del método de costo de reposición como lo estipula el COOTAD, se calcula el valor de m² de construcción unitario determinado en función de número pisos, tipo de la estructura, categoría de acabados y condición de la propiedad.

A cada tipología constructiva se le asigna un valor unitario por m² de construcción de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 23

Valor unitario de construcción por m² según el tipo de estructura, condición de la propiedad, rango de pisos y acabados

| Tipo de estructura | 1-3 pisos | | | | | | | | | | | | 4-5 pisos | | | | | | | |
|--------------------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|--------------------------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|------|------|------|
| | Acabados | | | | | | | | | | | | Acabados | | | | | | | |
| | A | B | C | D | E | F | B | C | D | E | F | | | | | | | | | |
| UP/PH | Unipropiedad | Propiedad horizontal | Unipropiedad | Propiedad horizontal | Unipropiedad | Propiedad horizontal | Unipropiedad | Propiedad horizontal | Unipropiedad | Propiedad horizontal | Unipropiedad y propiedad | Unipropiedad | Propiedad horizontal | Unipropiedad | Propiedad horizontal | Unipropiedad | Propiedad horizontal | | | |
| Hormigón armado | 174 | 274 | 300 | 418 | 455 | 575 | 638 | 769 | 830 | 855 | 921 | 317 | 428 | 465 | 649 | 721 | 860 | 929 | 1115 | 1201 |
| Acero/metálico | 164 | 285 | 312 | 415 | 451 | 641 | 711 | 831 | 898 | 926 | 997 | 302 | 421 | 458 | 673 | 747 | 898 | 969 | 1104 | 1189 |
| Ladrillo/Bloque | 141 | 218 | 239 | 390 | 424 | 604 | 671 | 798 | 861 | | | 230 | 415 | 451 | 636 | 706 | 994 | 1073 | | |
| Adobe/Tapiál | 133 | 195 | 213 | 315 | 342 | 569 | 631 | 761 | 822 | 848 | 913 | 211 | 309 | 336 | 595 | 660 | 789 | 852 | 1030 | 1109 |
| Madera | 138 | 228 | 249 | 406 | 441 | 584 | 648 | 783 | 845 | | | | | | | | | | | |
| Piedra | | 200 | 219 | 268 | 291 | 506 | 562 | | | | | | | | | | | | | |
| Caña guadua | 128 | 169 | 184 | 211 | 229 | | | | | | | | | | | | | | | |
| Cercha porticada | | 162 | 177 | 218 | 237 | 312 | 346 | 548 | 591 | | | | | | | | | | | |

| Tipo de estructura | 6-9 pisos | | | | | | Mas de 9 pisos | | | | | | | | | |
|--------------------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|------|------|------|
| | Acabados | | | | | | Acabados | | | | | | | | | |
| | C | D | E | F | C | D | E | F | C | D | E | F | | | | |
| Unipropiedad | Propiedad horizontal | Unipropiedad | Propiedad horizontal | Unipropiedad | Propiedad horizontal | Unipropiedad | Propiedad horizontal | Unipropiedad | Propiedad horizontal | Unipropiedad | Propiedad horizontal | Unipropiedad | Propiedad horizontal | | | |
| Hormigón armado | 472 | 513 | 679 | 753 | 1030 | 1112 | 1368 | 1473 | 527 | 573 | 730 | 811 | 1169 | 1262 | 1593 | 1715 |
| Acero/metálico | 446 | 485 | 708 | 786 | 1034 | 1116 | 1357 | 1462 | 510 | 554 | 733 | 814 | 1216 | 1314 | 1658 | 1785 |

Nota: Obtenido de ORDENANZA No. 0196 Municipio de Quito, 2017.

Los acabados exteriores A, B, C, D, E y F de la tabla anterior se establecen de acuerdo a las paredes, cubiertas, ventanas, vidrios y puertas, dichos acabados exteriores tienen una calificación para determinar su nivel de participación se realiza una sumatoria y se clasifica según la siguiente tabla:

Tabla 24*Acabados exteriores con su respectiva clasificación*

| Acabados exteriores de paredes, cubiertas, ventanas vidrios y puertas | | |
|---|---|--------------|
| Acabados | Características | Calificación |
| Paredes | Vidrio (vidrio estructural, curtain wall) | 8 |
| | Mármol/ Granito | 7 |
| | Alucobond | 6 |
| | Piedra importadora/porcelanato | 5 |
| | Steel panel | 5 |
| | Madera tratada | 5 |
| | Fachaleta/cerámica/espacato | 4 |
| | Hormigón arquitectónico | 4 |
| | Texturizados (chafado, grafiado, champeado) | 4 |
| | Enlucido y pintado | 3 |
| | Madera ordinaria (sin acabados) | 2 |
| | Enlucido sin pintura | 2 |
| | Pintado sobre mampostería/revocado | 1 |
| | No tiene o mampostería sin enlucir | 0 |
| Cubierta | Policarbonato/ Acrílico/vidrio | 6 |
| | Teja asfáltica/Lámina asfáltica | 6 |
| | Teja industrializada/ Teja plana | 6 |
| | Cerámica/Gress/Tejuelo | 5 |
| | No tiene (solo losa) | 5 |
| | Steel panel/ Teja metálica | 4 |
| | Asbesto cemento | 3 |
| | Teja común | 3 |
| Ventanas | Zinc/paja | 1 |
| | PVC | 7 |
| | Madera tratada | 6 |
| | Aluminio anodizado | 5 |
| | Aluminio común natural | 4 |
| | Madera ordinaria | 3 |
| Vidrios | Hierro | 2 |
| | No tiene | 1 |
| | Vitales (artísticos) | 6 |
| | Laminado/reflectivo | 5 |
| | Catedral/esmerilado | 3 |
| | Bronce/ color | 2 |
| Puertas | Claro | 2 |
| | No tiene | 0 |
| | Madera maciza con vitral | 4 |
| | Madera maciza/Vidrio/puerta de seguridad | 3 |
| | Aluminio con vidrio | 3 |
| | Madera con hierro | 3 |
| | Puerta enrollable | 2 |
| | Tool / metálica | 2 |
| Madera ordinaria MDF | 2 | |
| No tiene (Tabla de monte) | 1 | |

Nota: Obtenido de ORDENANZA No. 0196 Municipio de Quito, 2017.

Los rangos para establecer las categorías de acabados según la sumatoria de los pesos se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 25

Rangos para establecer las categorías de acabados según la sumatoria de pesos

| Tipo | Rango | Categoría |
|------|-------|-----------|
| A | 3-8 | Popular |
| B | 9-12 | Económica |
| C | 13-17 | Normal |
| D | 18-21 | Primera |
| E | 22-31 | Lujo |

Nota: Obtenido de ORDENANZA No. 0196 Municipio de Quito, 2017.

Cálculo del costo de reposición

Anteriormente se clasificó el Barrio San Enrique de Velasco dentro de los índices difusos que están en función de los gastos de una familia, en el estudio y cálculo de índices difusos realizados, se determinó que pertenece a una clase social media baja y la clase social media típica, que se la definirá como clase baja y clase media. Por lo tanto, para las tipologías mencionadas se realizó la siguiente clasificación:

Tabla 26

Calificación de los acabados de la tipología CR+CIP/LFLINF+DUC/HEX:2,3,4,5

| Tipología | Nivel socioeconómico | Clasificación de los acabados | | Calificación |
|---------------------------|----------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------|
| CR+CIP/LFLINF+DUC/HEX:2,5 | Clase media típica | Paredes | Enlucido y pintado | 3 |
| | | Cubierta | No tiene (solo losa) | 5 |
| | | Marcos de ventana | Aluminio común natural | 4 |
| | | Vidrios | Claro | 2 |
| | | Puertas | Madera maciza/madera y hierro | 3 |
| | | Total | | |

Nota: Obtenido de ORDENANZA No. 0196 Municipio de Quito, 2017, Elaboración propia.

Con una sumatoria de 17 en su calificación y según la tabla 25 esta tipología queda dentro de la categoría Normal de tipo C, posteriormente se verifica en la tabla 23 para un rango de pisos de 1 a 3, acabado tipo C y la estructura de hormigón armado, el costo unitario de construcción es de \$418 por m². Y de 4-5 pisos es de \$428 por m².

Para las demás tipologías se realizó el mismo procedimiento el cual se detalla en la sección de anexos 4, posteriormente se presenta una tabla resumen de los resultados obtenidos del costo por m² de cada tipología

Tabla 27

Tabla resumen del costo por m² de cada tipología estructural

| Tipología | Nivel socioeconómico | Calificación | Categoría | Tipo | Costo por m ² |
|---------------------------------|----------------------|--------------|-----------|------|--------------------------|
| CR+CIP/LFLINF+DUC/HBET:2,3 | Clase media típica | 17 | Normal | C | \$ 418.00 |
| CR+CIP/LFLINF+DUC/HBET:4,5 | Clase media típica | 17 | Normal | C | \$ 428.00 |
| CR+CIP/LFLSINF+DUC/HBET:1,2,3 | Clase media típica | 17 | Normal | C | \$ 418.00 |
| CR+CIP/LFLSINF+DUC/HEX:4 | Clase media típica | 17 | Normal | C | \$ 428.00 |
| CR+CIP/LFLSINF/DNO/ HBET: 1,2,3 | Clase media baja | 14 | Normal | C | \$ 418.00 |
| CR+CIP/LFLSINF/DNO/ HEX: 4 | Clase media baja | 14 | Normal | C | \$ 428.00 |
| MCF+CBH/LWAL/DNO/HBET:1,2,3 | Clase media baja | 14 | Normal | C | \$ 390.00 |
| MUR+CBH/LWAL/DNO/HBET: 1,2 | Clase media baja | 9 | Económica | B | \$ 390.00 |
| MUR+ADO/LWAL/DNO/ HEX: 1 | Clase media baja | 9 | Económica | B | \$ 195.00 |
| S+S99/LFINF/DUC/HEX:1 | Clase media típica | 9 | Económica | B | \$ 285.00 |
| UNK/L99/DNO/HEX:1 | Clase media baja | 4 | Popular | A | \$ 141.00 |

Nota. Elaboración propia.

Como un parámetro de comparación de los valores obtenidos por la metodología propuesta, y debido a que está en base al año 2017 y lo que se busca es que sea actualizado, por la fecha en la se está desarrollando este proyecto se ha consultado los costos a la arquitecta Patricia Sánchez que se encuentra inscrita y habilitada para ejercer la profesión dentro del Municipio del Distrito Metropolitano de Quito desde el año 2016, la cual según su opinión y conocimiento en el rango de valores de los costos

actuales de la construcción está entre 400 y 440 dólares por m², para estructuras de hormigón armado.

Resultados del modelo de exposición más probable (M0)

El modelo de exposición se compone del catálogo de las tipologías estructurales que se encuentran en la zona de estudio con sus respectivas características estructurales presentadas en este capítulo, material de construcción, sistema de resistencia a cargas laterales, número de pisos, costos de reposición y área de construcción. Los datos principales para el modelo de exposición fueron obtenidos como se mencionó a partir de recopilación de información de manera remota. Cabe recalcar que existe cierta incertidumbre en la identificación de ciertos sistemas estructurales ya que la visualización exterior puede no ser suficiente para identificar el sistema de resistencia de carga lateral así su información sea recopilada de manera presencial, por lo que se asignó un dato de confiabilidad en el momento de recopilar la información de la edificación.

De tal manera que se definió al modelo de exposición inicial (M0) como el más probable, en la tabla 28 se muestran las tipologías del sector de estudio con sus costos de reposición en función de su área construida y sus costos de reposición.

Tabla 28

Tipologías estructurales, área construida y costo de reposición para la opción más probable del modelo de exposición.

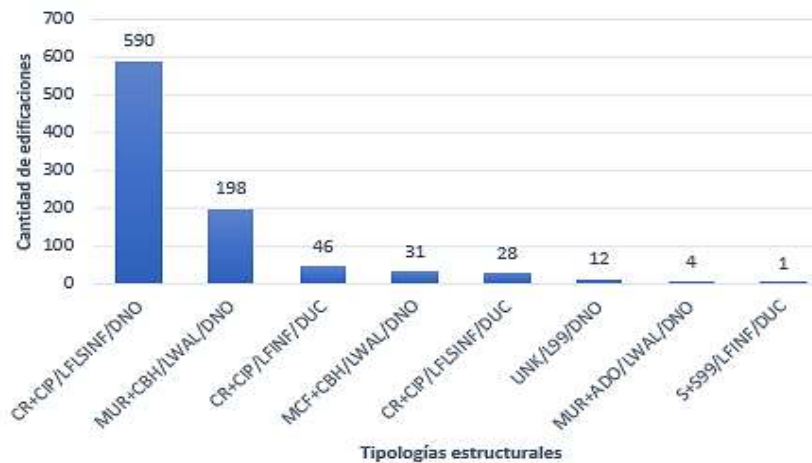
| N° | TIPOLOGÍAS ESTRUCTURALES | EDIFICACIONES | PORCENTAJE | ÁREA CONSTRUIDA (m2) | COSTO/M2 | COSTO DE REPOSICIÓN |
|----|--------------------------|---------------|------------|----------------------|-----------|---------------------|
| 1 | CR+CIP/LFLSINF/DNO/HEX:1 | 267 | 29,34% | 40702,172 | \$ 418,00 | \$ 17.013.507,90 |
| 2 | CR+CIP/LFLSINF/DNO/HEX:2 | 201 | 22,09% | 54942,644 | \$ 418,00 | \$ 22.966.025,19 |
| 3 | MUR+CBH/LWAL/DNO/HEX:1 | 177 | 19,45% | 28051,313 | \$ 390,00 | \$ 10.940.012,07 |
| 4 | CR+CIP/LFLSINF/DNO/HEX:3 | 110 | 12,09% | 26606,998 | \$ 418,00 | \$ 11.121.725,16 |
| 5 | MCF+CBH/LWAL/DNO/HEX:1 | 25 | 2,75% | 5236,42 | \$ 390,00 | \$ 2.042.203,80 |
| 6 | CR+CIP/LFINF/DUC/HEX:4 | 21 | 2,31% | 12161,79 | \$ 428,00 | \$ 5.205.246,12 |
| 7 | MUR+CBH/LWAL/DNO/HEX:2 | 21 | 2,31% | 8620,84 | \$ 390,00 | \$ 3.362.127,60 |
| 8 | CR+CIP/LFLSINF/DUC/HEX:2 | 13 | 1,43% | 3075,834 | \$ 418,00 | \$ 1.285.698,61 |
| 9 | CR+CIP/LFLSINF/DNO/HEX:4 | 12 | 1,32% | 3638,756 | \$ 428,00 | \$ 1.557.387,57 |
| 10 | UNK/L99/DNO/HEX:1 | 12 | 1,32% | 1734,164 | \$ 141,00 | \$ 244.517,12 |
| 11 | CR+CIP/LFINF/DUC/HEX:5 | 10 | 1,10% | 9142,14 | \$ 428,00 | \$ 3.912.835,92 |
| 12 | CR+CIP/LFINF/DUC/HEX:2 | 9 | 0,99% | 17478,89 | \$ 418,00 | \$ 7.306.176,02 |
| 13 | CR+CIP/LFLSINF/DUC/HEX:3 | 9 | 0,99% | 1835,26 | \$ 418,00 | \$ 767.138,68 |
| 14 | CR+CIP/LFINF/DUC/HEX:3 | 6 | 0,66% | 1047,77 | \$ 418,00 | \$ 437.967,86 |
| 15 | CR+CIP/LFLSINF/DUC/HEX:4 | 5 | 0,55% | 1274,59 | \$ 428,00 | \$ 545.524,52 |
| 16 | MCF+CBH/LWAL/DNO/HEX:2 | 5 | 0,55% | 1558,528 | \$ 390,00 | \$ 607.825,92 |
| 17 | MUR+ADO/LWAL/DNO/HEX:1 | 4 | 0,44% | 767,49 | \$ 195,00 | \$ 149.660,55 |
| 18 | CR+CIP/LFLSINF/DUC/HEX:1 | 1 | 0,11% | 430,17 | \$ 418,00 | \$ 179.811,06 |
| 19 | MCF+CBH/LWAL/DNO/HEX:3 | 1 | 0,11% | 309,33 | \$ 390,00 | \$ 120.638,70 |
| 20 | S+599/LFINF/DUC/HEX:1 | 1 | 0,11% | 92,5 | \$ 285,00 | \$ 26.362,50 |

Nota: En la tabla se detallan las tipologías específicas de acuerdo a su número de pisos, con sus respectivos costos de reposición y área construida, por Elaboración propia.

En la figura 67, 68, 69 se muestran los resultados para el modelo de exposición más probable, el mayor porcentaje, un 64,8% corresponde como se mencionó a las edificaciones de hormigón armado o concreto reforzado con sistema de resistencia a cargas laterales de pórticos con mampostería de relleno y losas alivianadas o macizas – vigas banda con un comportamiento esperado no dúctil, como la opción más probable y representativa, con un área de construcción de 125891 m² y un costo de reposición de \$52,6 millones de dólares.

Figura 67

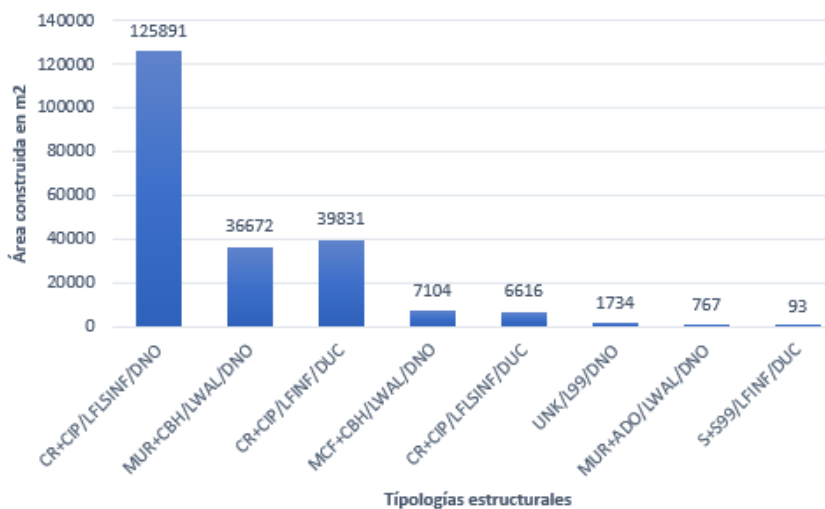
Tipologías estructurales y cantidad de edificaciones para el modelo de exposición más probable.



Nota: Se muestran las tipologías estructurales generales para la opción más probable del modelo de exposición M0, por elaboración propia.

Figura 68

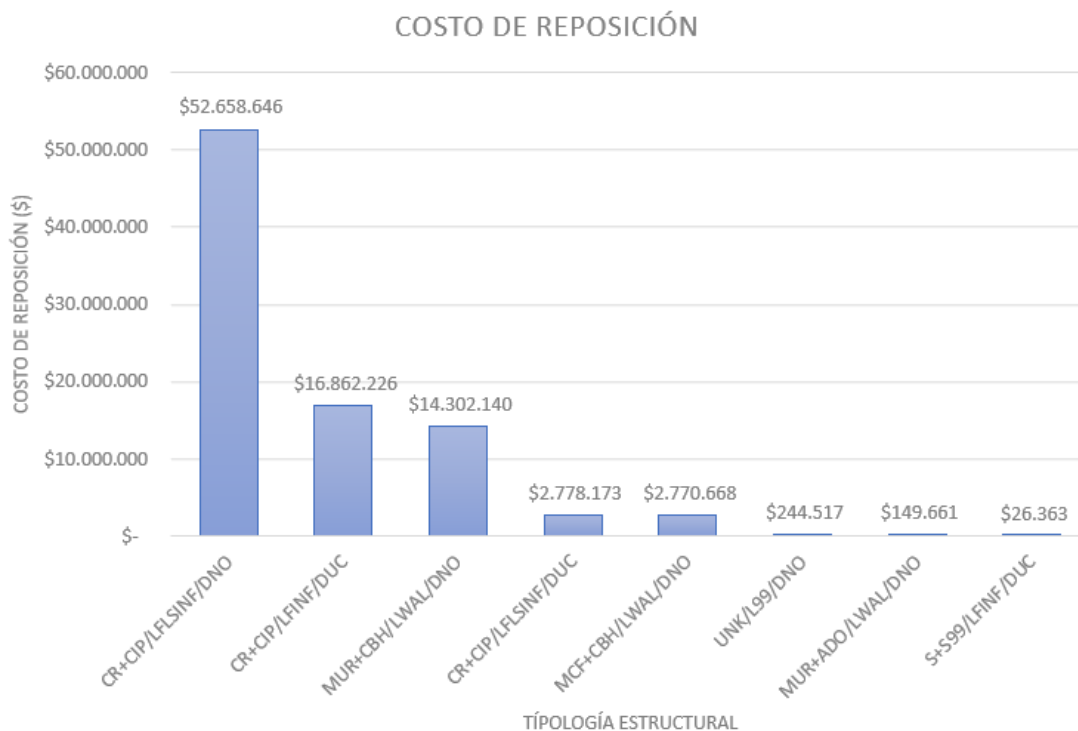
Área construida (m²) del Modelo de exposición más probable. M0



Nota: Por elaboración propia.

Figura 69

Costo de reposición del modelo de exposición M0 en dólares.

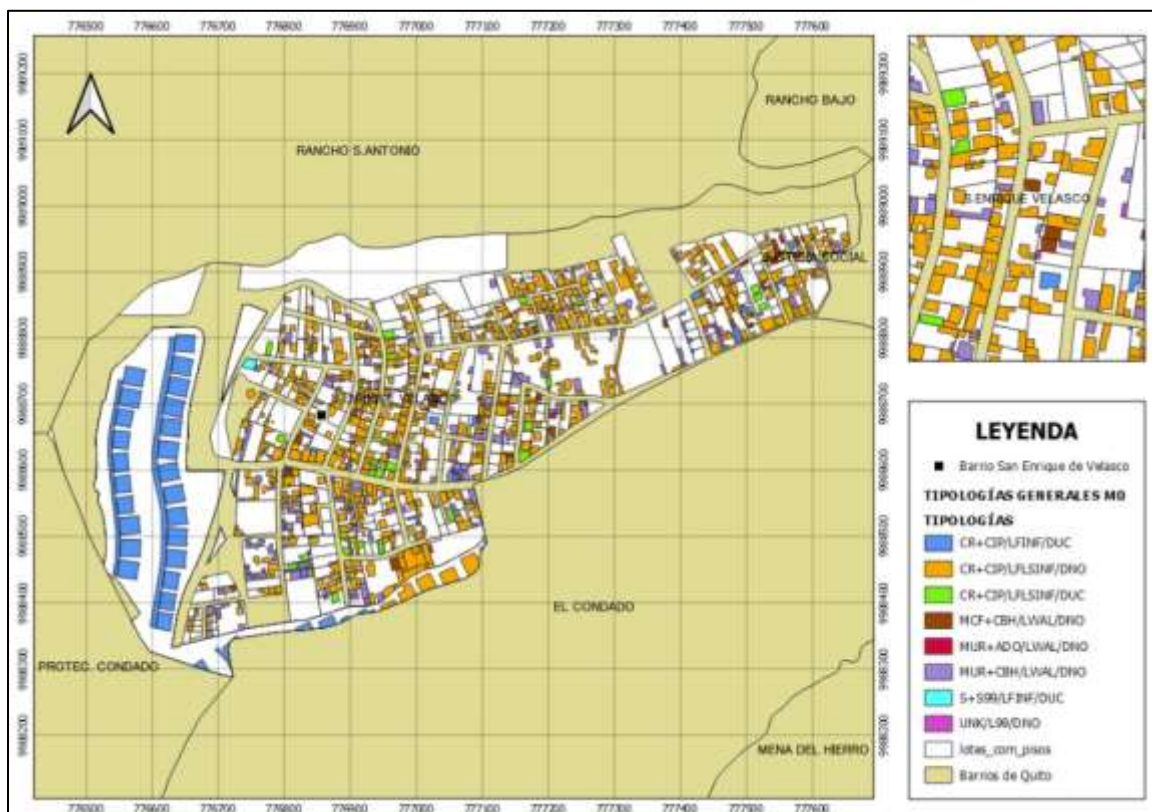


Nota: Por elaboración propia.

El total de edificaciones para el modelo de exposición M0, son las 910 edificaciones residenciales con un área de construcción total de 218707,60 m² de construcción y un costo de reposición total de todas las edificaciones de \$89,8 millones de dólares.

Figura 70

Tipologías generales del sector de estudio



Nota: Por elaboración propia.

Variabilidad en el Modelo de Exposición

Esta metodología planteada para medir la incertidumbre y comparar la variabilidad de los resultados en la información del modelo de exposición y del riesgo sísmico fue desarrollada por Hinestroza, (2018) en la “Evaluación del riesgo sísmico de viviendas de Barrancabermeja”.

Existe incertidumbre en el momento de levantar información realizando inspecciones externas en ciertas tipologías estructurales, por lo que se ha determinado en el levantamiento de información un grado de confianza para considerar la variabilidad del modelo de exposición en cuanto a las métricas y resultados del cálculo del riesgo

sísmico. La variabilidad de los modelos de exposición consiste en cambiar o modificar las tipologías estructurales de ciertas edificaciones por las opciones o sistemas probables, con características similares, y determinar la influencia de esas nuevas edificaciones o grupo de edificaciones en el cálculo del riesgo sísmico.

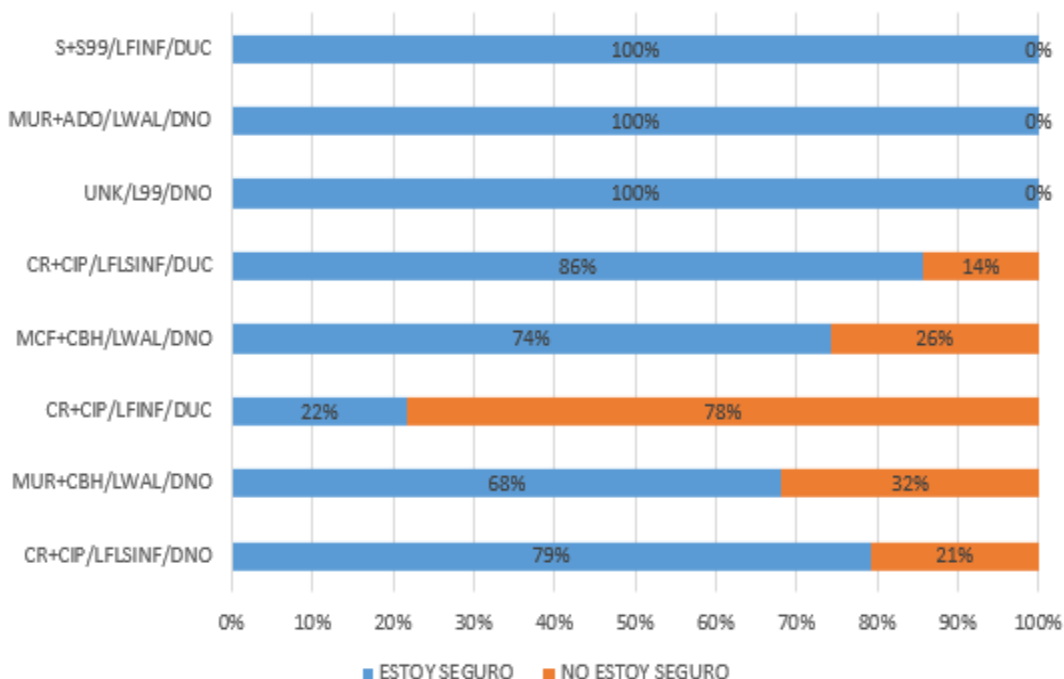
Confusión de las tipologías estructurales

Con el objetivo de analizar la influencia de la incertidumbre en el momento de seleccionar las características de las edificaciones al levantar la información necesaria para los modelos de exposición y para posteriormente cuantificar el riesgo sísmico, se han elaborado 9 modelos de exposición distintos, tomando como el modelo de exposición base al modelo M0. Con los datos de las encuestas se crea el modelo inicial y a partir de la variación de datos de acuerdo a la información y confiabilidad de las encuestas remotas, se crean los modelos de exposición variando cada tipología estructural por su opción más probable.

En la figura 70 se muestra el porcentaje de edificaciones en el levantamiento de acuerdo a cada tipología estructural, donde se indica si hubo o no seguridad al asignar una tipología estructural, a través de la variación de tipologías de acuerdo a la confiabilidad de su asignación.

Figura 71

Nivel de incertidumbre en la asignación de las tipologías estructurales.



Nota: Por elaboración propia.

En la tabla 29 se muestra la matriz de variación o confusión de las tipologías estructurales, las tipologías con más características similares, que se confunden entre sí. En la tabla se indican los modelos de exposición correspondientes a la variación de una tipología estructural por su opción más probable, cabe recalcar que cada modelo estima la variación de una tipología en específico, por ejemplo el modelo de exposición M3 considera la variación de las tipologías de mampostería no reforzada cuyo sistema de resistencia a carga lateral es el de muro de mampostería de bloque, con un comportamiento no dúctil variándolo por una tipología de mampostería confinada, al no variar todas las tipologías se puede evidenciar cual es la incidencia real de cada tipología en específico en los valores más representativos del modelo de exposición como es el costo de reposición, o el área de construcción.

Tabla 29

Matriz de variación de tipologías estructurales

| | | OTRAS OPCIONES PROBABLES | | | | | | | |
|------------------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------|---------------------|-------------------------|
| | TIPOLOGÍAS | CR+CIP/ LFLSINF/ DNO | MUR+CBH/ LWAL/ DNO | CR+CIP/ LFINF/ DUC | MCF+CBH/ LWAL/ DNO | CR+CIP/ LFLSINF/ DUC | UNK/ L99/ DNO | DO/ LWAL/ DNO | S+S99/ LFINF/ DUC |
| TIPOLOGÍAS DEL MODELO MÁS PROBABLE | CR+CIP/ LFLSINF/ DNO | | | M1 | | M2 | | | |
| | MUR+CBH/ LWAL/ DNO | | | | M3 | | | | |
| | CR+CIP/ LFINF/ DUC | M4 | | | | M5 | | | |
| | MCF+CBH/ LWAL/ DNO | | M6 | | | | | | |
| | CR+CIP/ LFLSINF/ DUC | M7 | | M8 | | | | | |
| | UNK/ L99/ DNO | | | | | | | | |
| | MUR+ADO/ LWAL/ DNO | | | | | | | | |
| | S+S99/ LFINF/ DUC | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |

Nota: Por Elaboración Propia.

Se muestra a continuación la explicación de los modelos de exposición y su variación:

- Modelos M1, M2

Las edificaciones cuya conformación de material es el hormigón armado o concreto armado en sitio, puede tener cierta variación en la identificación del sistema de resistencia lateral o su nivel de ductilidad, en el caso de las edificaciones que pertenecen a tipologías como CR+CIP/LFLSINF/DNO, CR+CIP/LFINF/DUC, poseen características muy

similares en cuanto a su conformación estructural, su sistema de resistencia lateral en el sistema de pórticos de concreto se diferencia por la conformación de vigas descolgadas en el sistema LFINF y de vigas banda en el sistema LFLSINF, en cuanto a ductilidad los criterios de asignar un comportamiento esperado dúctil son el año de construcción, los aspectos arquitectónicos y estéticos de la estructura o edificación. Sin embargo, puede existir cierta incertidumbre a pesar de que una estructura sea estéticamente arquitectónica, su comportamiento estructural puede ser deficiente.

Para el modelo M1 se consideró un 21% de las edificaciones CR+CIP/LFLSINF/DNO con incertidumbre en el levantamiento como CR+CIP/LFINF/DUC, mientras que en el modelo M2, se consideró con un comportamiento esperado dúctil es decir como CR+CIP/LFLSINF/DUC. En el modelo M0 la tipología CR+CIP/LFLSINF/DNO corresponde a un porcentaje del 64,8%, y CR+CIP/LFINF/DUC a un 5,1% mientras que en el modelo M2 con la variación de las tipologías considerando la incertidumbre la tipología CR+CIP/LFLSINF/DNO corresponde al 51,3% y CR+CIP/LFINF/DUC al 18,6%. Los resultados principales de cada modelo de exposición sobre su cantidad de edificaciones, porcentaje, área construida y costo de reposición se muestran en el anexo 3.

- Modelos M3, M6

En los modelos M3 y M6 se varían las tipologías estructurales de mampostería, lo que son tipologías de mampostería confinada y mampostería no reforzada, es sencillo identificar este tipo de construcciones y definir su sistema de resistencia lateral, frecuentemente son edificaciones o estructuras de vivienda de máximo un piso, con techo de zinc o asbesto cemento, se genera cierta confusión cuando las tipologías con

completamente enlucidas, ya que no permite identificar si existe elementos confinantes como columnas para catalogar como mampostería confinada.

En el modelo M3 se varió las tipologías de mampostería no reforzada por mampostería confinada, en el modelo M6 viceversa. Para el modelo M0 el porcentaje de tipologías MUR+CBH/LWAL/DNO corresponde al 21,8%, mientras que para M3 corresponde al 14,8% del total de tipologías.

- Modelos M4, M5

Similares a los modelos M1 y M2 existe incertidumbre cuando no se puede identificar una tipología estructural de hormigón armado, su sistema de resistencia lateral, al igual que las anteriores tipologías, esto pasa cuando toda la estructura como tal tiene su respectivo recubrimiento, y puede existir dificultad al identificar su sistema estructural, para el modelo M4 se varió las tipologías CR+CIP/LFINF/DUC por CR+CIP/LFLSINF/DNO y CR+CIP/LFLSINF/DUC respectivamente.

- Modelos M7, M8

En el modelo M7 y M8 se varía el 14% de las tipologías CR+CIP/LFLSINF/DUC por CR+CIP/LFLSINF/DNO y CR+CIP/LFINF/DUC, tomando en consideración que la confusión de tipologías se puede dar por los criterios ya mencionados en el modelo M1 y M2 o M4 y M5.

- Modelos M9

Se elaboró un último modelo para considerar una variación simultánea de todas las tipologías que presentan incertidumbre en el levantamiento de información

estructural, partiendo del modelo de exposición inicial M0, se cambian todas las tipologías por una segunda opción más probable de acuerdo a la matriz de variación de tipologías.

Por otra parte como se evidenció en los resultados del nivel de incertidumbre, tipologías estructurales de sistema de resistencia lateral desconocido con un comportamiento esperado no dúctil UNK/L99/DNO, o las construcciones categorizadas dentro de la tipología MUR+ADO/LWAL/DNO, es decir las construcciones en mampostería de adobe y la tipología de acero S+S99/LFINF/DUC en el caso del estudio presente no se presentó incertidumbre en el momento de asignar tipologías estructurales esto debido a que su identificación cuenta con las suficientes evidencias para poder asignar la tipología correspondiente.

En el caso de las tipologías UNK/L99/DNO cuya identificación es muy sencilla al visualizar sus aspectos arquitectónicos y constructivos improvisados, además de que con frecuencia se presenta la incompatibilidad de materiales en su conformación, ya sean pingos de madera, láminas de zinc, mallas entre otros hacen que su identificación o asignación no presenten dificultad.

Las edificaciones pertenecientes a la tipología MUR+ADO/LWAL/DNO que corresponden a construcciones realizadas con mampostería de Adobe, son fácilmente identificables por sus fachadas y paredes.

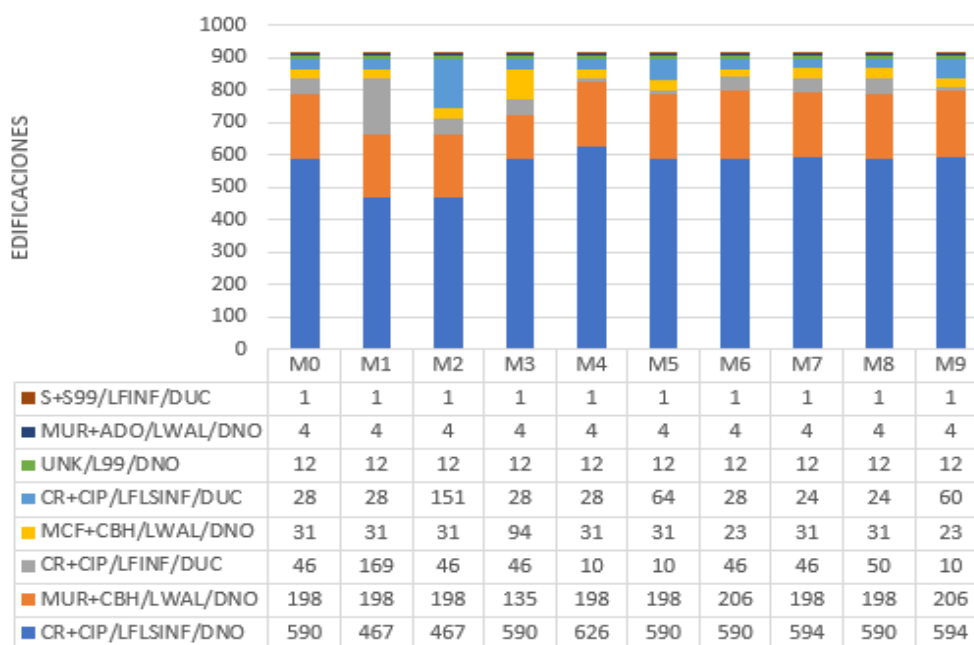
Y en el caso de la tipología de acero que en el sector de estudio se evidencio solo una, cuyos miembros estructurales son de acero, su identificación es sencilla.

Resultados de los modelos de exposición

En las figuras 71, 72, 73 se indican la cantidad de edificaciones, el área construida y los costos de reposición respectivamente, del modelo de exposición más probable M0 y de los modelos de exposición de variación, las tipologías estructurales más comunes corresponde a las edificaciones de hormigón armado o concreto armado en sitio, cuyo sistema de resistencia a carga lateral corresponde a los pórticos con losas alivianadas o macizas con vigas banda (CR+CIP/LFLSINF/DNO) con un porcentaje que varía entre el 68% y 51% de las 910 edificaciones del modelo de exposición, el área de construcción y los costos de reposición totales son iguales para todos los modelos de exposición, para el estudio presente se calculó un área de construcción de 218707 metros cuadrados y un costo de reposición de \$89,8 millones de dólares.

Figura 72

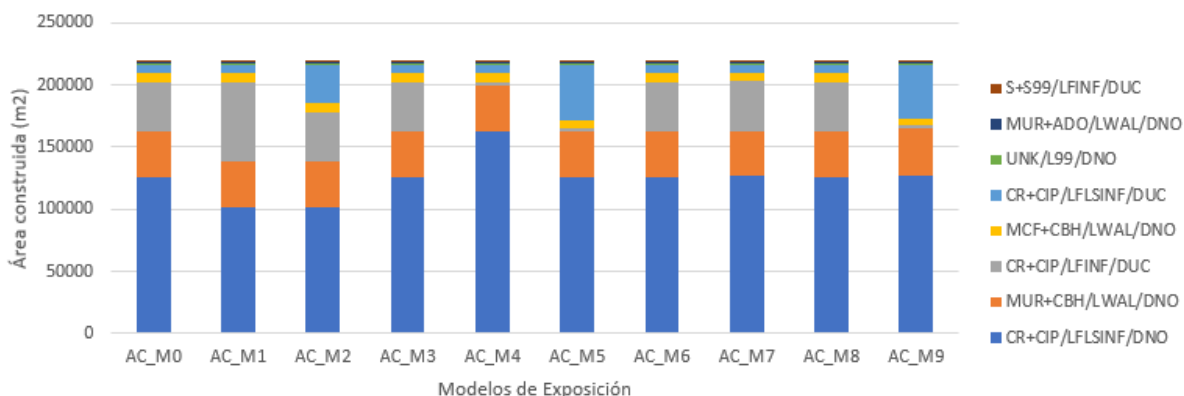
Cantidad de Edificaciones para cada modelo de exposición.



Nota: Se muestra el número de edificaciones de cada modelo de exposición de acuerdo a las tipologías estructurales, por elaboración propia.

Figura 73

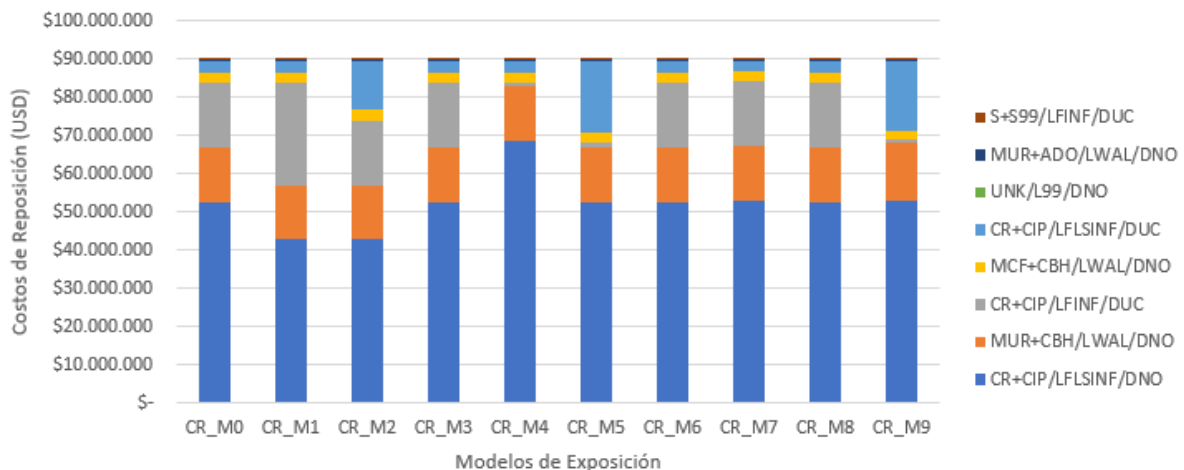
Área de construcción de acuerdo al modelo de exposición.



Nota: Se indica el área construida de los modelos de exposición de acuerdo a cada tipología estructural, por Elaboración Propia.

Figura 74

Costos de reposición de los modelos de exposición de acuerdo a sus tipologías estructurales.



Nota: Se indica el costo de reposición de los modelos de exposición y de cada tipología estructural, por elaboración propia.

Capítulo V

Vulnerabilidad

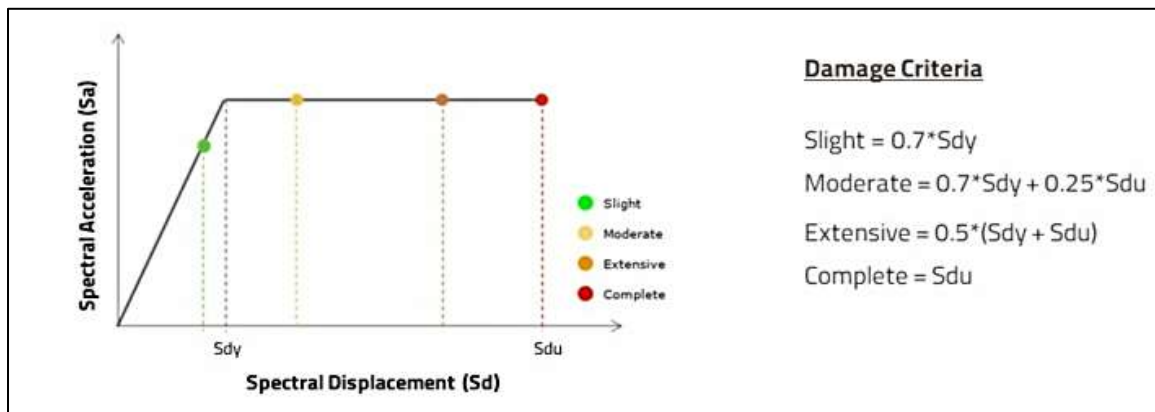
Vulnerabilidad

Es necesario realizar una evaluación de la vulnerabilidad para una caracterización particular del movimiento del suelo que representará la demanda sísmica del terremoto en una estructura. Tradicionalmente de forma macro sísmica se ha utilizado la intensidad y la aceleración máxima del suelo (PGA), mientras que las propuestas más recientes han vinculado de la vulnerabilidad sísmicas de las estructuras a los espectros de respuesta obtenidos del movimiento del suelo (Calvi et al., 2006).

El programa OpenQuake asocia a la vulnerabilidad con pérdidas económicas o humanas y a la fragilidad con daños como resultado del evento sísmico. El presente estudio tiene como objetivo definir curvas de fragilidad por lo que se optó por escoger aquellas curvas desarrolladas por otros investigadores en todo el mundo los cuales se encuentran dentro del programa OpenQuake antes mencionado.

Estados de Daño

Una estructura se considera en un estado específico de daño cuando el suelo tuvo un movimiento. Establecen el nivel de daño que experimentará un activo expuesto cumpliendo ciertos parámetros de demanda, por ejemplo: piso interior, deriva máxima, aceleración del piso, desplazamiento máximo del techo y así sucesivamente.

Figura 75*Estados de daño*

Nota: En la siguiente figura se muestra la curva de capacidad, mostrando que, si la estructura excede su desplazamiento final, terminaría en estado de daño completo.

Tomado de *Openquake- Escenario de daños y pérdidas: Antecedentes teóricos*, por (Global Earthquake Model, 2020).

Los estados de daño que se presentan son leve, moderado, extensivo y colapso. Para determinar daños en las edificaciones que soportan temblores de tierra, el método a utilizar parte de las funciones de daño, incluyen las curvas de fragilidad que describen la probabilidad de alcanzar o superar los diferentes estados de daño dado la respuesta pico del edificio.

Según Chávez (2016) para estimar los daños al utilizar las curvas de fragilidad y de capacidad se requiere de:

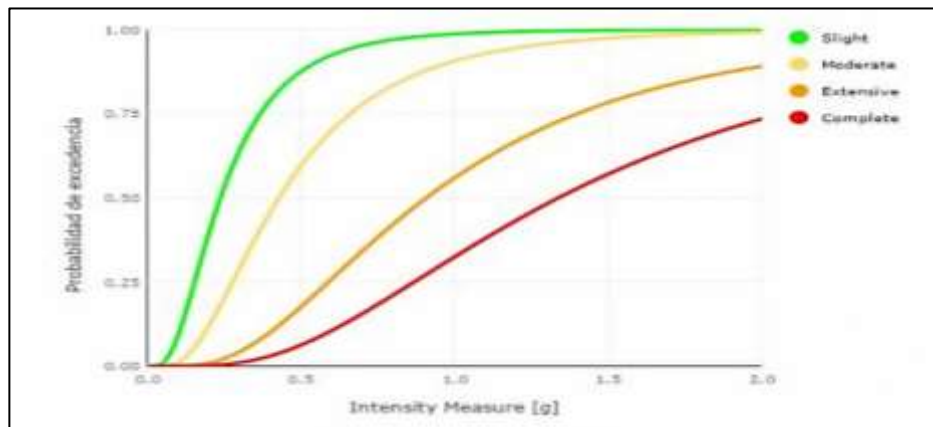
- Tipos de modelos de construcción incluye la altura, el nivel de daño sísmico que representa la edificación o grupo de edificaciones de interés.
- Espectro de respuesta (o PGA, para sismos de diseño, y PGD para evolución de fallas de suelo) en los centroides de la sección de área del sitio de estudio.

Curvas de fragilidad

En el análisis de riesgos los modelos de fragilidad establecen la relación entre la probabilidad de exceder varios estados de daño como leve, moderado, extensivo y completo dado un cierto nivel de temblor del suelo, dicha relación se puede describir en el software OpenQuake utilizando una continua función matemática como funciones logarítmicas normales como se muestra en la siguiente figura:

Figura 76

Función Continua



Nota: En la siguiente figura se muestra la función continua, en la que la probabilidad de daño aumenta con un incremento de la intensidad del movimiento del suelo. Tomado de Openquake - Escenario de daños y pérdidas: Antecedentes teóricos, por (Global Earthquake Model, 2020).

Las estructuras más frágiles presentan un mayor nivel de riesgo, el desarrollo de modelos de fragilidad requiere de análisis detallados del comportamiento dinámico de las estructuras, en el programa OpenQuake se puede encontrar múltiples modelos de fragilidad desarrollados por diferentes autores en todo el mundo.

Para la validez de los resultados del riesgo sísmico depende de que tan adecuadas sean las curvas de fragilidad, justificando su aplicabilidad, tomando en

cuenta las edificaciones del sector de estudio, dichos autores deben coincidir con la misma caracterización de estados límites de daños, a partir de las taxonomías obtenidas en el modelo de exposición se asignaron las siguientes curvas de fragilidad.

Tabla 30

Asignación de curvas de fragilidad a las taxonomías del Barrio San Enrique de Velasco

| Taxonomía | Nombre de la curva de fragilidad | Autor |
|--------------------------|---|--|
| CR+CIP/LFINF/DUC/HEX:2 | CR/LFINF+DUC/HEX:2/RES (GEM) | Villar-Vega (2017) - LFINF/H:2 |
| CR+CIP/LFINF/DUC/HEX:3 | CR/LFINF+DUC/HEX:3/RES (GEM) | Villar-Vega (2017) - LFINF/H:3 |
| CR+CIP/LFINF/DUC/HEX:4 | CR/LFINF+DUC/HEX:4/RES (GEM) | Villar-Vega (2017) - LFINF/H:4 |
| CR+CIP/LFINF/DUC/HEX:5 | CR/LFINF+DUC/HEX:5/RES (GEM) | Villar-Vega (2017) - LFINF/H:5 |
| CR+CIP/LFLSINF/DNO/HEX:1 | CR/LFINF+DNO/HEX:1/RES (GEM) | Villar-Vega (2017) - LFINF/H:1 |
| CR+CIP/LFLSINF/DNO/HEX:2 | CR/LFINF+DNO/HEX:2/RES (GEM) | Villar-Vega (2017) - LFINF/H:2 |
| CR+CIP/LFLSINF/DNO/HEX:3 | CR/LFINF+DNO/HEX:3/RES (GEM) | Villar-Vega (2017) - LFINF/H:3 |
| CR+CIP/LFLSINF/DNO/HEX:4 | CR/LFINF+DNO/HEX:4/RES (GEM) | Villar-Vega (2017) - LFINF/H:4 |
| CR+CIP/LFLSINF/DUC/HEX:1 | CR/LFINF+DUC/HEX:1/RES (GEM) | Villar-Vega (2017) - LFINF/H:1 |
| CR+CIP/LFLSINF/DUC/HEX:2 | CR/LFINF+DUC/HEX:2/RES (GEM) | Villar-Vega (2017) - LFINF/H:2 |
| CR+CIP/LFLSINF/DUC/HEX:3 | CR/LFINF+DUC/HEX:3/RES (GEM) | Villar-Vega (2017) - LFINF/H:3 |
| CR+CIP/LFLSINF/DUC/HEX:4 | CR/LFINF+DUC/HEX:4/RES (GEM) | Villar-Vega (2017) - LFINF/H:4 |
| MCF/LWAL/DNO/HEX:1 | MCF/LWAL+DNO/HEX:1/RES (GEM) | Villar-Vega (2017) - MCF/H:1/DNO |
| MCF/LWAL/DNO/HEX:2 | MCF/LWAL+DNO/HEX:2/RES (GEM) | Villar-Vega (2017) - MCF/H:2/DNO |
| MCF/LWAL/DNO/HEX:3 | MCF/LWAL+DNO/HEX:3/RES (GEM) | Villar-Vega (2017) - MCF/H:3/DNO |
| MUR+CBH/LWAL/DNO/HEX:1 | MUR/LWAL+DNO/HEX:1/RES (GEM) | Villar-Vega (2017) - MUR/H:1 |
| MUR+CBH/LWAL/DNO/HEX:2 | MUR/LWAL+DNO/HEX:2/RES (GEM) | Villar-Vega (2017) - MUR/H:2 |
| MUR+ADO/LWAL/DNO/HEX:1 | MUR+ADO/LWAL+DNO/HEX:1/RES (GEM) | Villar-Vega (2017) - MUR+ADO/H:1 |
| STEEL /LFINF/DUC/HEX:1 | SRC/LFM/HBET:1,3 (GEM) | Liao (2006) - Steel Reinforced Concrete, Moment Frame, High Code (1-3 stories) |
| RES/L99/DNO/HEX:1 | UNK (GEM) | Villar-Vega (2017) - UNK |

Nota: En la siguiente tabla se muestra la asignación de las curvas de fragilidad tomadas del software OpenQuake, por Elaboración Propia.

Curvas de fragilidad (Villar-Vega et al., 2017)

Desarrollaron curvas de fragilidad de diversas estructuras residenciales representativas de Venezuela, Perú, Ecuador, Colombia, Chile, Bolivia y Argentina. Se desarrollaron curvas para pórticos de concretos resistentes a momento dúctiles y no dúctiles entre 1 y 7 pisos (con y sin mampostería adosada), mampostería confinada dúctil y no dúctil entre 1 y 3 pisos, mampostería no reforzada de 1 a 6 pisos, muros de

concreto reforzado de 5 a 10 pisos, estructuras de madera liviana y estructuras desconocidas.

Se evidenció en el modelo de exposición la existencia de la tipología CR+CIP/LFLSINF/DNO/HEX1,2,3,4, su sistema de resistencia lateral LFLSINF no cuenta con curvas de fragilidad aplicables al contexto ecuatoriano, por lo que se optó por asignar la curva de fragilidad CR+CIP/LFLINF/DNO/HEX1,2,3,4, de igual manera la tipología CR+CIP/LFLSINF/DUC/HEX1,2,3,4, se optó por asignar la curva de fragilidad CR+CIP/LFLINF/DUC/HEX1,2,3,4, considerando que tienen características similares.

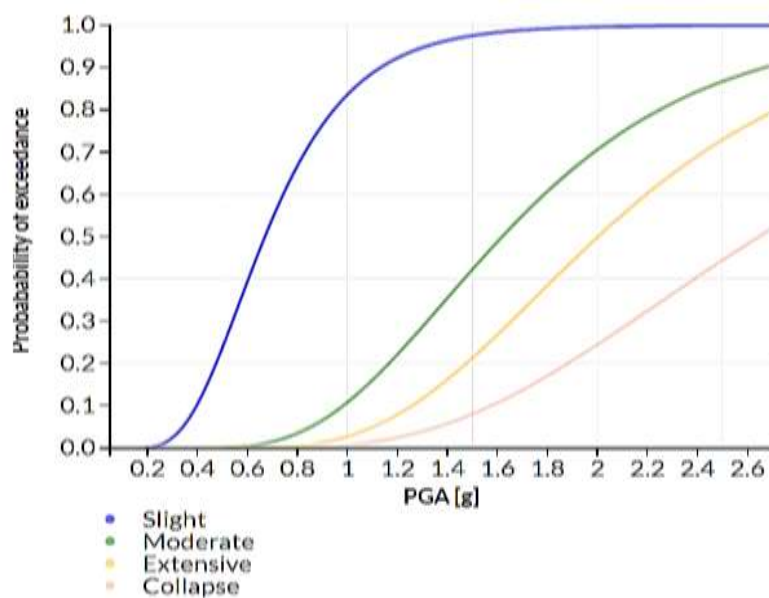
Dentro del software OpenQuake se escogieron las curvas de fragilidad de manera adecuada con características similares de las tipologías que se desarrollaron en el sector de estudio, desarrolladas por Villar-Vega et al. 2017.

- CR/LFINF+DUC y CR/ LFINF +DNO, entre 1 y 5 pisos
- MCF/LWAL+DNO, entre 1 y 3 pisos
- MUR+CBH/LWAL/DNO, entre 1 y 2 pisos
- UNK/L99+DNO de 1 piso

Mostradas a continuación en las siguientes figuras:

Figura 77

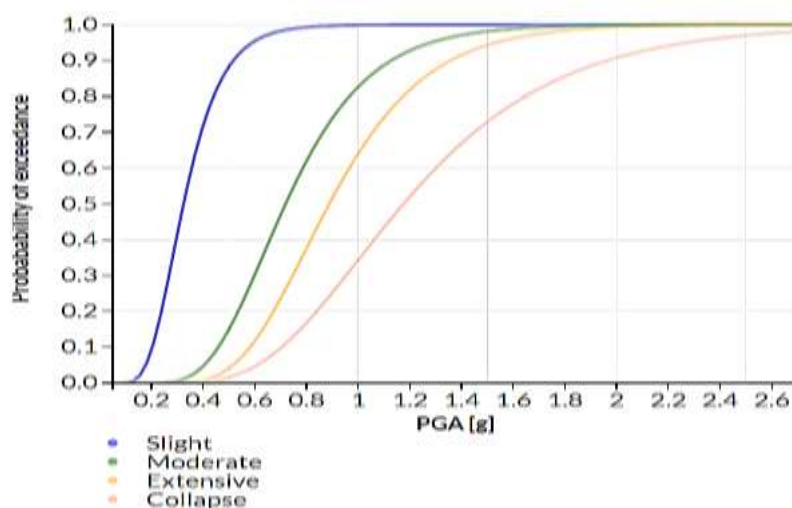
CR/LFINF+DUC/HEX:1/RES



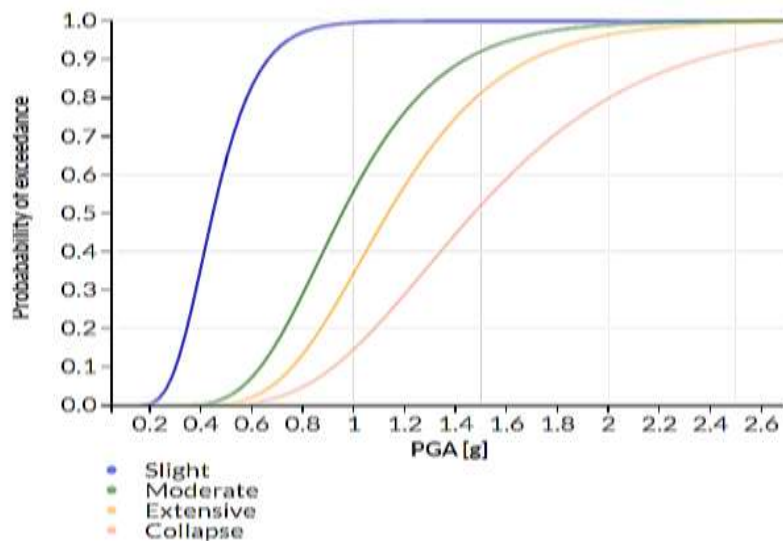
Nota: Curva de fragilidad desarrollada por Villar-Vega et al., (2017), tomada de (OpenQuake Platform, 2021).

Figura 78

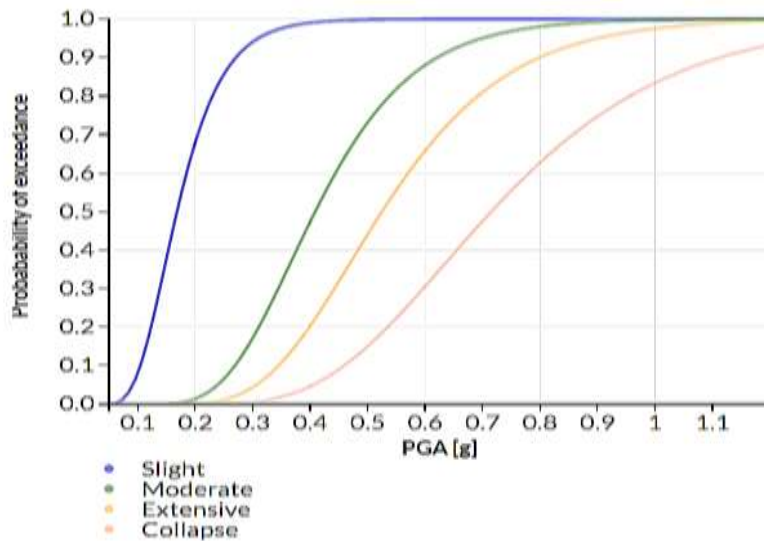
CR/LFINF+DNO/HEX:1/RES



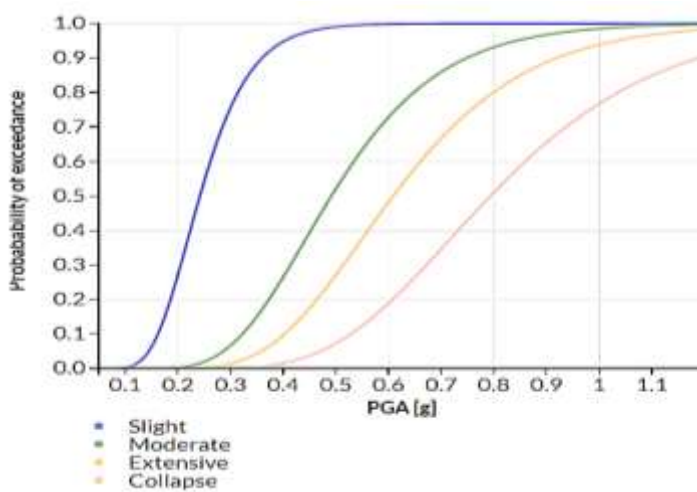
Nota: Curva de fragilidad desarrollada por Villar-Vega et al., (2017), tomada de (OpenQuake Platform, 2021).

Figura 79*MCF/LWAL+DNO/HEX:1/RES*

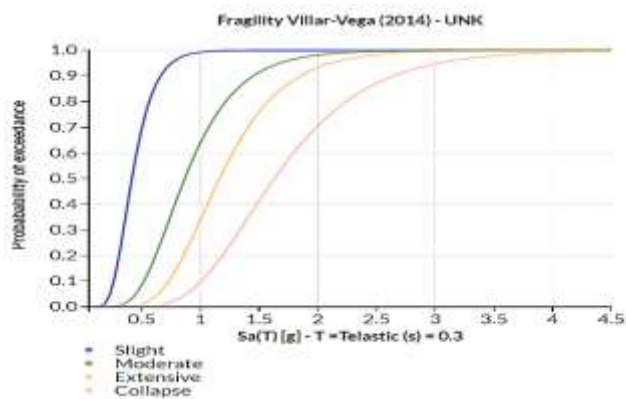
Nota: Curva de fragilidad desarrollada por Villar-Vega et al., (2017), tomada de (OpenQuake Platform, 2021).

Figura 80*MUR+ADO/LWAL+DNO/HEX:1/RES*

Nota: Curva de fragilidad desarrollada por Villar-Vega et al., (2017), tomada de (OpenQuake Platform, 2021).

Figura 81*MUR/LWAL+DNO/HEX:1/RES*

Nota: Curva de fragilidad desarrollada por Villar-Vega et al., (2017), tomada de (OpenQuake Platform, 2021).

Figura 82*UNK-RES (GEM)*

Nota: Curva de fragilidad desarrollada por Villar-Vega et al., (2017), tomada de (OpenQuake Platform, 2021).

Las demás curvas de fragilidad desarrolladas por este autor se encuentran en el anexo 4.

Curvas de fragilidad Liao (2006)

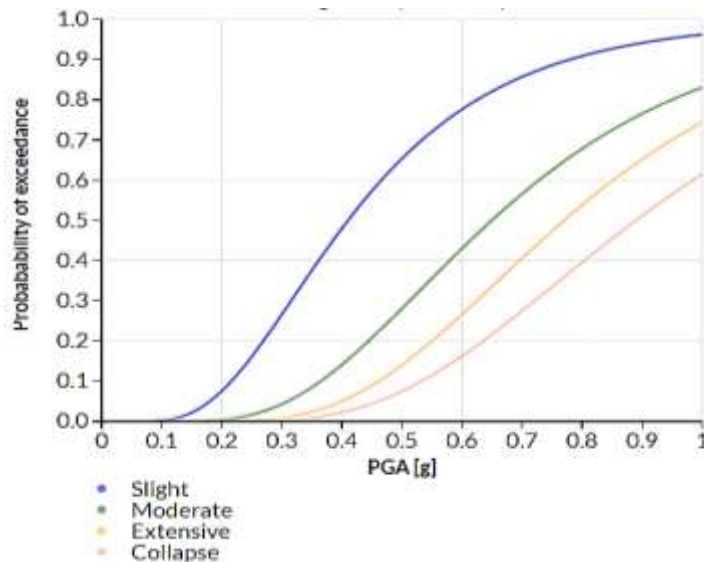
Desarrolló curvas de fragilidad basadas en la aceleración máxima (PGA) y en el desplazamiento permanente del suelo (PGD), utilizó la metodología HAZUS 99, y utiliza el programa TELES para evaluar la fragilidad de edificios y lo clasifica por número de pisos de 1 a más de 8 pisos, tipo de material de estructuras de acero, estructuras de hormigón, pared de mampostería y estructura de acero reforzado características que se ajustan a la tipología desarrollada en nuestro estudio.

- SRC/LFM/HBET:1,3 (GEM)

A continuación, se visualiza en la siguiente figura:

Figura 83

SRC/LFM/HBET:1,3



Nota: Curva de fragilidad desarrollada por Villar-Vega et al., (2017), tomada de (OpenQuake Platform, 2021).

Después de seleccionar las curvas de fragilidad que representan este inventario de estructuras, se transformaron en curvas de vulnerabilidad a través de un modelo de consecuencias desarrollado posteriormente.

Modelo de consecuencias

Estos modelos transforman los estados de daños en pérdidas económicas. Generalmente vienen de la opinión de expertos al observar y analizar los estados de daños de las estructuras afectadas por un sismo y relacionando los costos requeridos para reponer la estructura (Hinestroza, 2018).

Para el cálculo del riesgo sísmico dentro del software OpenQuake, se creó un archivo CSV delimitado por comas, donde los datos obtenidos dentro de las curvas de fragilidad y clasificados por taxonomías con estados de daño leve, moderado, extenso y colapso cada una en media y desviación estándar como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 31

Modelo de Consecuencia

| taxonomy | slight mean | slight std dev | moderate mean | moderate std dev | extensive mean | extensive std dev | collapse mean | collapse std dev |
|----------------------------|-------------|----------------|---------------|------------------|----------------|-------------------|---------------|------------------|
| CR/LFINF+DNO/HEX:1/RES | 0.3463 | 0.13 | 0.7646 | 0.2763 | 0.9378 | 0.3186 | 1.2732 | 0.5302 |
| CR/LFINF+DNO/HEX:2/RES | 0.44 | 0.1481 | 1.1155 | 0.4441 | 1.6584 | 0.9089 | 2.8673 | 1.8942 |
| MUR/LWAL+DNO/HEX:1/RES | 0.2541 | 0.0807 | 0.5191 | 0.1749 | 0.6416 | 0.2121 | 0.8345 | 0.2709 |
| CR/LFINF+DNO/HEX:3/RES | 0.0909 | 0.0437 | 0.2278 | 0.1229 | 0.3591 | 0.1854 | 0.6304 | 0.3373 |
| MCF/LWAL+DNO/HEX:1/RES | 0.4692 | 0.1477 | 1.005 | 0.3295 | 1.1923 | 0.3842 | 1.5737 | 0.5968 |
| CR/LFINF+DUC/HEX:4/RES | 0.1473 | 0.0724 | 0.5205 | 0.3353 | 0.8902 | 0.6057 | 1.6324 | 1.1521 |
| MUR/LWAL+DNO/HEX:2/RES | 0.341 | 0.0935 | 0.7322 | 0.2444 | 0.9811 | 0.3774 | 1.5208 | 0.8339 |
| CR/LFINF+DUC/HEX:2/RES | 0.8578 | 0.2843 | 2.2826 | 0.8923 | 3.2473 | 1.523 | 6.9004 | 5.7769 |
| CR/LFINF+DNO/HEX:4/RES | 0.0968 | 0.0363 | 0.2706 | 0.1219 | 0.4137 | 0.1932 | 0.7775 | 0.4598 |
| RES | 0.4441 | 0.1651 | 0.9397 | 0.3926 | 1.2414 | 0.4651 | 1.7509 | 0.6856 |
| CR/LFINF+DUC/HEX:5/RES | 0.1631 | 0.0672 | 0.566 | 0.2973 | 0.9536 | 0.5711 | 1.8859 | 1.4017 |
| CR/LFINF+DUC/HEX:2/RES | 0.8578 | 0.2843 | 2.2826 | 0.8923 | 3.2473 | 1.523 | 6.0094 | 5.7769 |
| CR/LFINF+DUC/HEX:3/RES | 0.1381 | 0.0762 | 0.4997 | 0.352 | 0.8581 | 0.6022 | 1.5818 | 1.0882 |
| CR/LFINF+DUC/HEX:3/RES | 0.1381 | 0.0762 | 0.4997 | 0.352 | 0.8581 | 0.6022 | 1.5818 | 1.0882 |
| CR/LFINF+DUC/HEX:4/RES | 0.1473 | 0.0724 | 0.5205 | 0.3353 | 0.8902 | 0.6057 | 1.6324 | 1.1521 |
| MCF/LWAL+DNO/HEX:2/RES | 0.532 | 0.2041 | 1.211 | 0.4378 | 1.607 | 0.729 | 2.5298 | 1.3191 |
| MUR+ADO/LWAL+DNO/HEX:1/RES | 0.1803 | 0.0692 | 0.4312 | 0.1445 | 0.5541 | 0.1866 | 0.7593 | 0.2705 |
| CR/LFINF+DUC/HEX:1/RES | 0.7283 | 0.3113 | 1.7468 | 0.7092 | 2.139 | 0.8044 | 2.8724 | 1.2147 |
| MCF/LWAL+DNO/HEX:3/RES | 0.1003 | 0.0529 | 0.2398 | 0.1495 | 0.3616 | 0.232 | 0.641 | 0.4283 |
| SRC/LFM/HBET:1,3 | 0.465 | 0.248 | 0.719 | 0.341 | 0.834 | 0.347 | 0.964 | 0.402 |

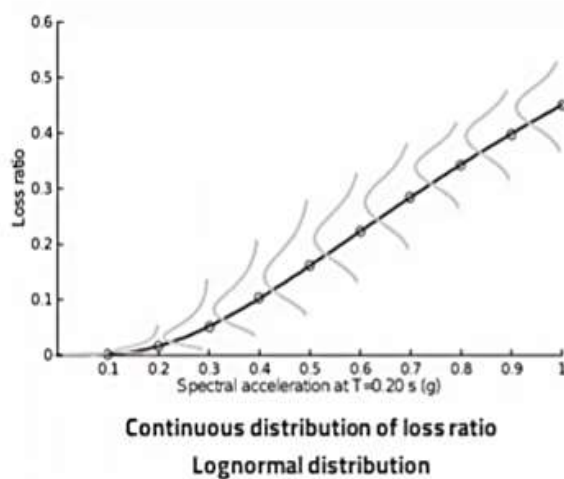
Nota: Elaboración propia.

Modelo de Vulnerabilidad

Los modelos de vulnerabilidad establecen una relación entre la intensidad del movimiento del suelo y el porcentaje de pérdida de valor o de los ocupantes afectados, dentro del software OpenQuake nos permite especificar funciones de vulnerabilidad mediante el valor esperado del porcentaje de pérdida y su incertidumbre asociada, la incertidumbre se puede especificar mediante distribución continua por ejemplo un Log normal como se muestra en la siguiente figura.

Figura 84

Modelos de vulnerabilidad

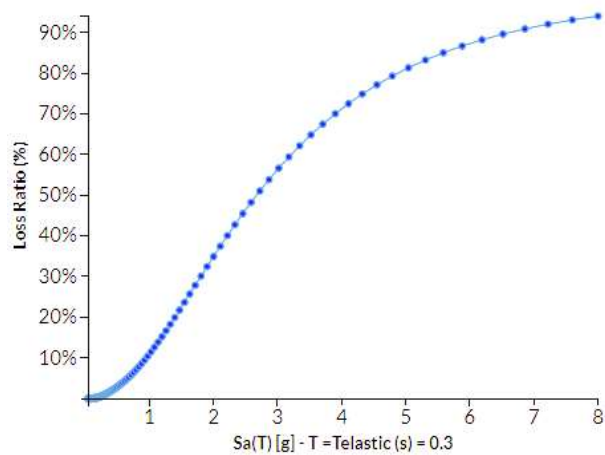


Nota: Se muestra la distribución log-normal, en el eje x la aceleración espectral y en el eje y y una relación de pérdidas. Tomado de Openquake- Escenario de daños y pérdidas: Antecedentes teóricos, por GEM, 2020.

A continuación, se presenta las curvas de vulnerabilidad tomadas de la plataforma OpenQuake para las tipologías expuestas anteriormente.

Figura 85

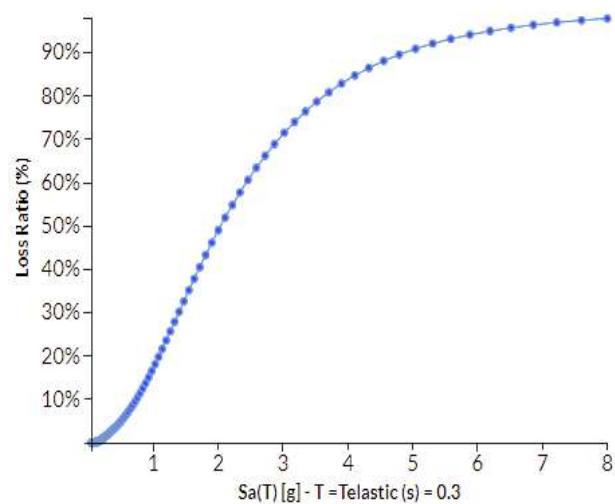
Curva de vulnerabilidad CR/LFINF+DUC



Nota. Tomada de (OpenQuake Platform, 2021).

Figura 86

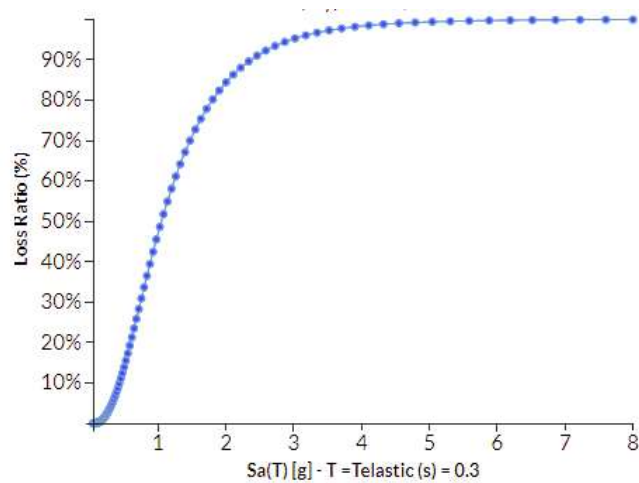
Curva de vulnerabilidad CR/LFINF+DNO



Nota. Tomada de (OpenQuake Platform, 2021).

Figura 87

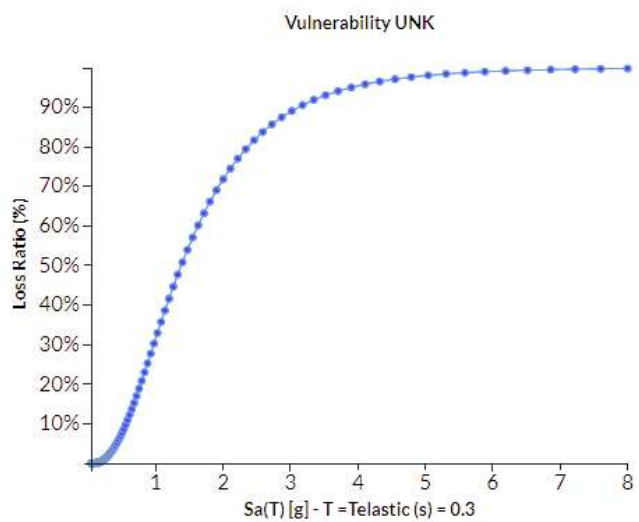
Curva de vulnerabilidad MUR+ADO/HBET:1



Nota. Tomada de (OpenQuake Platform, 2021).

Figura 88

Curva de vulnerabilidad UNK



Nota. Tomada de (OpenQuake Platform, 2021).

Capítulo VI

Evaluación del riesgo sísmico

Software OpenQuake para Evaluación del riesgo sísmico

Para poder calcular las pérdidas económicas y estados de daño, se integran los 3 modelos descritos y desarrollados en los capítulos anteriores, OpenQuake, un software de uso libre desarrollado por la fundación GEM, permite la integración de los tres parámetros principales cargando la información en archivos de csv, para transformarlos a NRML, formato utilizado para que el código del programa pueda ejecutar los respectivos cálculos, y mostrar los resultados en archivos de información descargable de Excel, o también resultados gráficos trabajando conjuntamente con Qgis, otro software de uso libre para la manejo de información geográfica.

Resultados de Riesgo sísmico usando modelo de exposición más probable

En este apartado se presentan los resultados de la integración del modelo de amenaza, exposición y fragilidad, para obtener métricas de riesgo para un escenario de amenaza previamente seleccionado a partir de la desagregación de la peligrosidad sísmica que se evidencia en el capítulo 3 del estudio presente. El escenario seleccionado es un sismo cortical para un período de retorno de 475 años, y los resultados se muestran en gráficas de pérdidas económica y colapsos de acuerdo a grupos estructurales o tipologías previamente definidas en el modelo de exposición.

Análisis de resultados de riesgo sísmico

El análisis del riesgo sísmico se utiliza para definir el impacto ante un escenario específico de riesgo utilizando un sismo con una magnitud, ubicación, y período de

retorno determinado además de definir las características de su fuente que permitan evaluar la amenaza y el impacto para una mejor toma de decisiones tomando como base, la cuantificación de pérdidas económicas y los daños causados en las edificaciones del Barrio. Además, es importante entender que el análisis de un escenario sísmico probable permite el desarrollo e implementación de futuros planes de contingencia (Hinestroza, 2018).

La selección del escenario sísmico se define previamente en base al sistema de fallas ciegas de Quito, que son las fuentes sísmicas con mayor influencia para el sector de estudio. En el capítulo 3, se realizó el estudio de amenaza para poder determinar las zonas fuentes de mayor sismicidad, las mismas que están asociadas al sistema de fallas presente en Quito, los mismos que determinan la probabilidad de ocurrencia de sismos corticales superficiales.

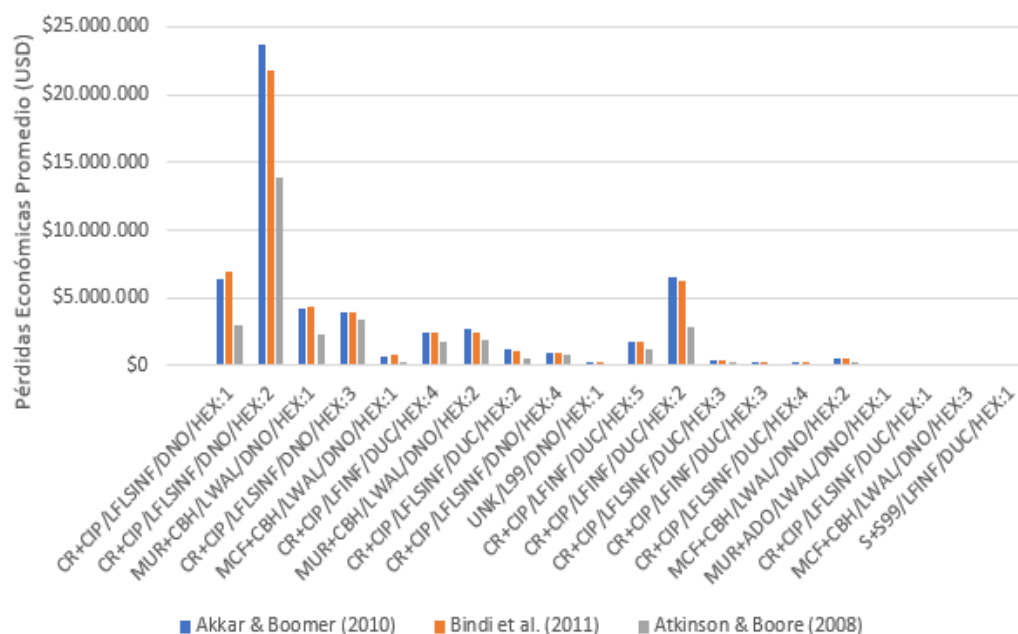
El escenario seleccionado se lo hizo para un período de retorno de 475 años, que es el período de retorno que estipula la NEC para un sismo de diseño, para un nivel de frecuencia y amenaza sísmica raro. El evento seleccionado calculado por Open Quake, está asociado como ya se mencionó a la falla activa de corteza terrestre Ilumbisí – La Bota, cuyas características asociadas a la falla se describen en la tabla 7.

Para el análisis del escenario sísmico seleccionado, se modeló 1000 campos del movimiento del terreno, para considerar la variación de las ecuaciones del movimiento fuerte de terreno utilizando un nivel de truncamiento de 3, características descritas en el modelo de amenaza del capítulo 3. Es importante puntualizar que las pérdidas económicas solo consideran un valor único promedio de los campos del movimiento (GMF), no se considera la variabilidad que reportan las ecuaciones del movimiento fuerte, a consecuencia de esto existe una pérdida económica promedio y un porcentaje de variación en función del nivel de truncamiento y los GMPEs.

En la figura 89 se muestran las pérdidas económicas promedio de acuerdo a cada tipología estructural, se identifica que la tipología perteneciente a pórticos de hormigón armado con sistema de vigas banda no dúctil, reporta las mayores pérdidas económicas promedio, tomando en cuenta edificaciones sin daño, daño leve, moderado, extensivo y colapso.

Figura 89

Pérdidas económicas para escenario de corteza superficial para cada tipología, de acuerdo a cada modelo de movimiento del terreno.



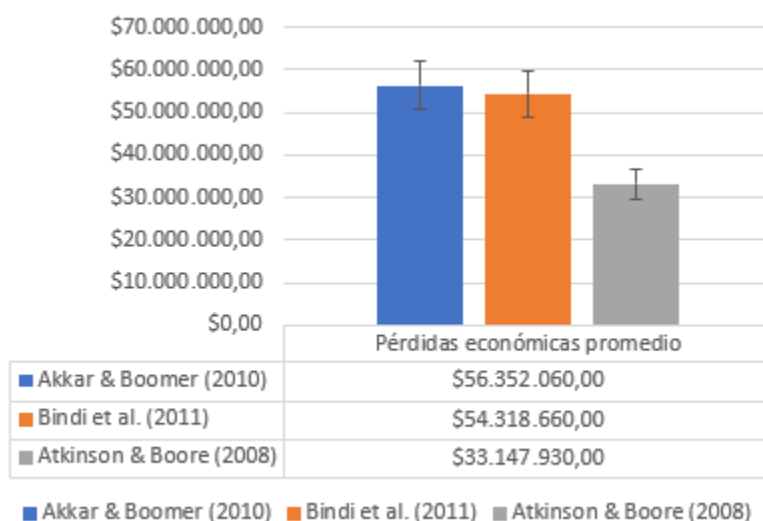
Nota: Por elaboración Propia.

En la figura 90 se presentan las pérdidas económicas promedio totales del Barrio San Enrique de Velasco, las pérdidas económicas aplicadas del Modelo de Boore et al. (2008), son las menores debido a que sus aceleraciones obtenidas en los campos de movimiento del modelo de amenaza alcanzan valores inferiores a los del modelo de Akkar y Bindi. La pérdida promedio probable para el escenario sísmico seleccionado en

términos económicos en cuanto a daños estructurales de las edificaciones es de \$47,9 millones de dólares, equivalentes a un 53% del costo de reposición total.

Figura 90

Pérdida económica promedio total de cada modelo de movimiento fuerte para un escenario de corteza superficial.



Nota: Por elaboración Propia.

Tabla 32

Pérdidas como porcentaje del costo de reposición.

| Escenario | Pérdida como porcentaje del costo de reposición de edificaciones | | | |
|-----------|--|---------------------|-------------------------|----------|
| | Akkar & Boomer (2010) | Bindi et al. (2011) | Atkinson & Boore (2008) | Promedio |
| Cort. 475 | 62,76% | 60,49% | 36,92% | 53,39% |

Nota: Por Elaboración propia.

En la tabla 33 y 34 se muestran los resultados del porcentaje de estructuras por estado de daño, se puede inferir mejor, en las taxonomías con sus características completas como en la tabla 33, incluyendo el número de pisos, por ejemplo, la tipología con más porcentaje probable de daño en colapso es CR+CIP/LFLSINF/DNO/HEX:4, la

tipología de hormigón armado en sitio con mampostería de relleno, sistema de resistencia lateral de pórticos con viga banda

Tabla 33

Porcentaje de estructuras de cada tipología estructural por pisos, de acuerdo a su estado de daño.

| N° | TAXONOMÍA | SIN DAÑO | LEVE | MODERADO | EXTENSIVO | COLAPSO |
|----|--------------------------|----------|------|----------|-----------|---------|
| 1 | CR+CIP/LFLSINF/DNO/HEX:1 | 45% | 36% | 6% | 5% | 8% |
| 2 | CR+CIP/LFLSINF/DNO/HEX:2 | 21% | 43% | 12% | 12% | 12% |
| 3 | MUR+CBH/LWAL/DNO/HEX:1 | 30% | 36% | 10% | 10% | 15% |
| 4 | CR+CIP/LFLSINF/DNO/HEX:3 | 5% | 23% | 19% | 23% | 30% |
| 5 | MCF+CBH/LWAL/DNO/HEX:1 | 62% | 28% | 3% | 3% | 4% |
| 6 | CR+CIP/LFINF/DUC/HEX:4 | 14% | 45% | 18% | 14% | 9% |
| 7 | MUR+CBH/LWAL/DNO/HEX:2 | 13% | 33% | 17% | 18% | 19% |
| 8 | CR+CIP/LFLSINF/DUC/HEX:2 | 53% | 36% | 5% | 3% | 3% |
| 9 | CR+CIP/LFLSINF/DNO/HEX:4 | 0% | 8% | 11% | 24% | 56% |
| 10 | UNK/L99/DNO/HEX:1 | 22% | 34% | 14% | 12% | 18% |
| 11 | CR+CIP/LFINF/DUC/HEX:5 | 17% | 50% | 16% | 10% | 7% |
| 12 | CR+CIP/LFINF/DUC/HEX:2 | 53% | 36% | 5% | 3% | 3% |
| 13 | CR+CIP/LFLSINF/DUC/HEX:3 | 13% | 44% | 19% | 15% | 9% |
| 14 | CR+CIP/LFINF/DUC/HEX:3 | 13% | 44% | 20% | 15% | 10% |
| 15 | CR+CIP/LFLSINF/DUC/HEX:4 | 14% | 46% | 18% | 14% | 9% |
| 16 | MCF+CBH/LWAL/DNO/HEX:2 | 29% | 40% | 9% | 11% | 12% |
| 17 | MUR+ADO/LWAL/DNO/HEX:1 | 16% | 41% | 13% | 13% | 19% |
| 18 | CR+CIP/LFLSINF/DUC/HEX:1 | 77% | 19% | 2% | 1% | 1% |
| 19 | MCF+CBH/LWAL/DNO/HEX:3 | 6% | 24% | 16% | 21% | 33% |
| 20 | S+S99/LFINF/DUC/HEX:1 | 58% | 20% | 7% | 5% | 10% |

Nota: Por elaboración Propia

Tabla 34

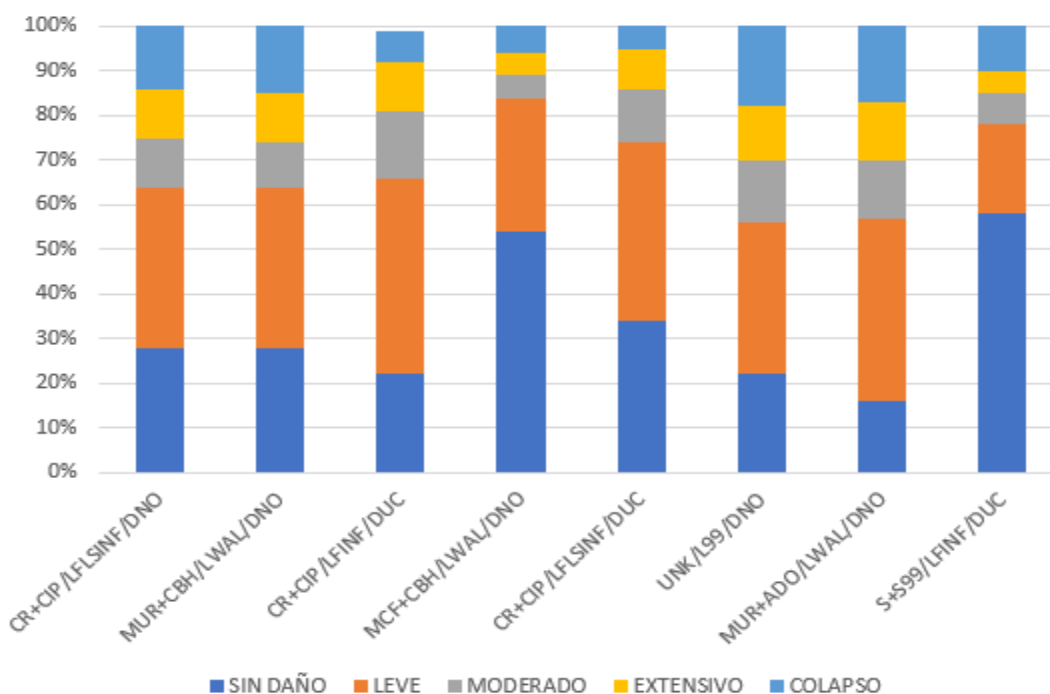
Porcentaje de estructuras de cada tipología estructural, de acuerdo a su nivel de daño.

| TIPOLOGÍAS ESTRUCTURALES | SIN DAÑO | LEVE | MODERADO | EXTENSIVO | COLAPSO |
|--------------------------|----------|------|----------|-----------|---------|
| CR+CIP/LFLSINF/DNO | 28% | 36% | 11% | 11% | 14% |
| MUR+CBH/LWAL/DNO | 28% | 36% | 10% | 11% | 15% |
| CR+CIP/LFINF/DUC | 22% | 44% | 15% | 11% | 7% |
| MCF+CBH/LWAL/DNO | 54% | 30% | 5% | 5% | 6% |
| CR+CIP/LFLSINF/DUC | 34% | 40% | 12% | 9% | 6% |
| UNK/L99/DNO | 22% | 34% | 14% | 12% | 18% |
| MUR+ADO/LWAL/DNO | 16% | 41% | 13% | 13% | 19% |
| S+S99/LFINF/DUC | 58% | 20% | 7% | 5% | 10% |

Nota: Por elaboración Propia

Figura 91

Porcentajes de estado de daño de las edificaciones por tipología estructural.



Nota: Se muestran los estados de daño que las edificaciones de cada tipología estructural alcanzarían. Por Elaboración Propia.

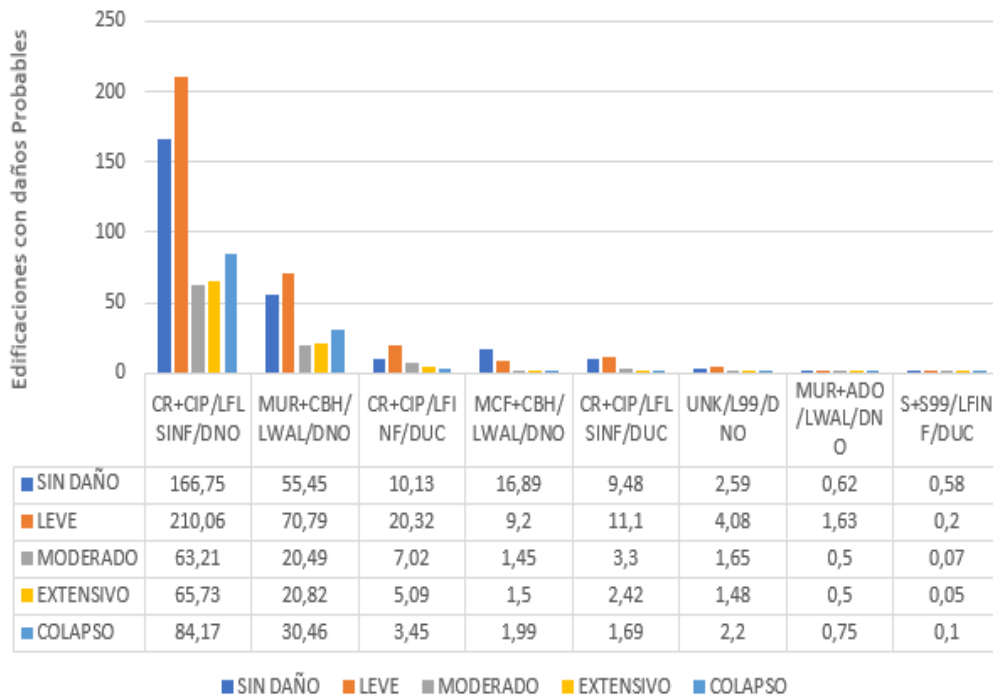
Los valores de la tabla 34 se aprecian en la figura 91, las edificaciones para el evento de análisis muestran mayoritariamente daños leves, sin embargo las edificaciones con probabilidad de alcanzar o exceder daños extensivos o de colapso representan un porcentaje significativo del sector de estudio, en total un 10,72% para edificaciones que alcancen o excedan daños extensivos y un 13,72% para edificaciones con riesgo de colapso como se visualiza en la figura 90 que corresponde a un total de 233 edificaciones de las cuales 125 podrían presentar estados de daño completo o colapso de edificaciones.

En la figura 94, 95, 96 Y 97 se muestran los mapas de la distribución de edificaciones que podrían alcanzar o exceder los estados de daño respectivos. Los mapas muestran en un rango de colores la probabilidad de alcanzar o exceder un

estado de daño determinado. El de mayor énfasis es el mapa de la figura 97 que muestra las edificaciones que podrían alcanzar o exceder un estado de daño completo o llegar al colapso.

Figura 92

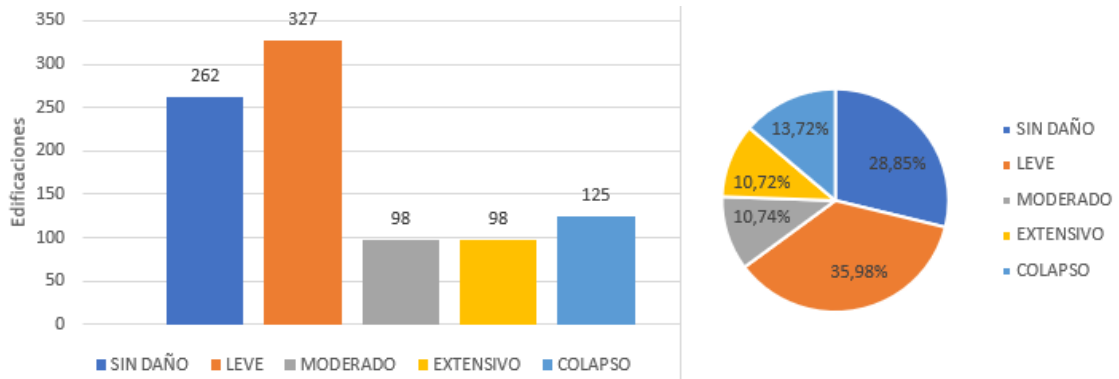
Edificaciones por tipología estructural de acuerdo a su nivel de daño.



Nota: Por Elaboración Propia.

Figura 93

Porcentajes de daño esperado para el modelo M0.



Nota: Por Elaboración Propia.

Figura 94

Mapa de edificaciones con probabilidad de alcanzar o superar estados de daño leve.



Nota: Por Elaboración Propia.

En la figura 95 se indican las edificaciones que podrían alcanzar o exceder un estado de daño moderado, para un escenario cortical de 475 años de período de retorno. El número de estructuras totales del barrio cuya probabilidad de alcanzar o exceder este estado de daño son 98 estructuras pertenecientes al 10,74% del total de edificaciones.

Figura 95

Mapa de edificaciones con probabilidad de alcanzar o exceder estados de daño moderado



Nota: En el mapa se indica la ubicación geográfica de las edificaciones que podrían alcanzar o exceder un estado de daño moderado, por Elaboración Propia.

Figura 96

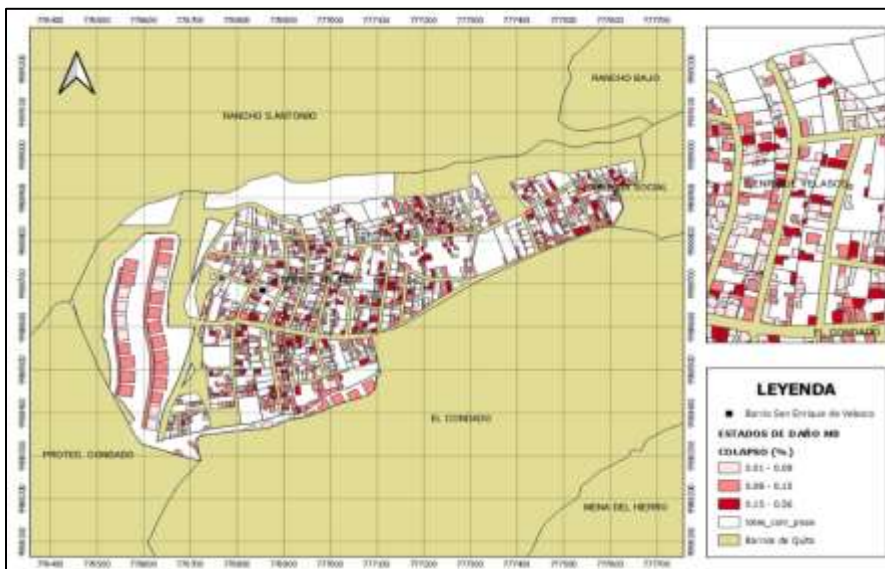
Mapa de edificaciones con probabilidad de alcanzar o superar estados de daño extensivo.



Nota: Por Elaboración Propia.

Figura 97

Mapa de edificaciones con riesgo de colapso.



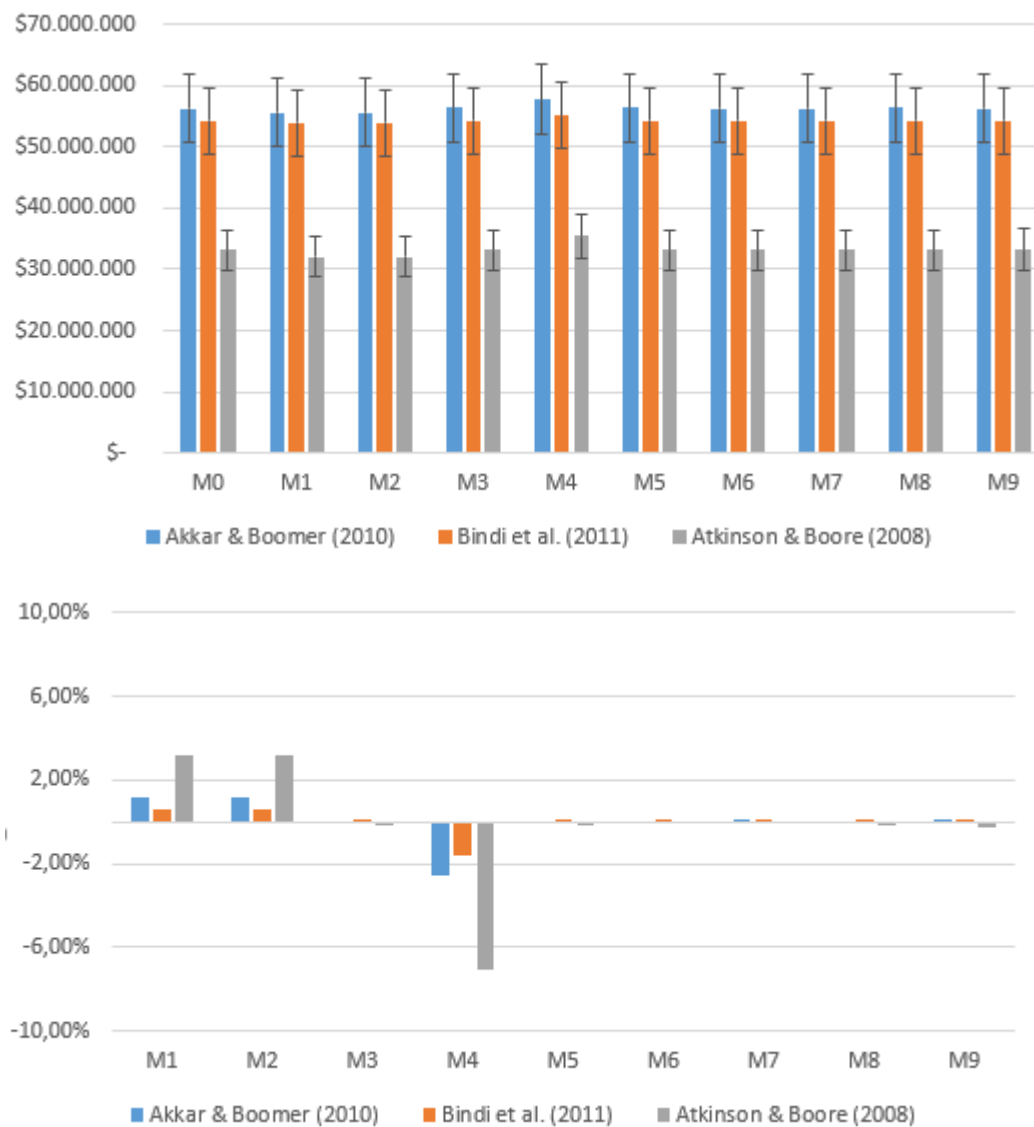
Nota: En el mapa se puede identificar en color rojo las edificaciones cuyo estado de daño podría alcanzar niveles de colapso para el escenario sísmico de corteza superficial de $T_r=475$ años, por Elaboración Propia.

Variabilidad de las pérdidas económicas y daños al considerar la incertidumbre del modelo de exposición.

Con el objetivo de determinar la variación de resultados en los estados de daño y pérdidas económicas, se calculó nueve modelos de exposición a partir del modelo más probable del Barrio San Enrique de Velasco, todos los modelos han sido evaluados ante el mismo escenario de amenaza, para un sismo cortical con las características mencionadas anteriormente para un período de retorno de 475 años.

Figura 98

Resultados en pérdidas económicas para un escenario cortical 475 de cada modelo de exposición respecto del modelo más probable M0.



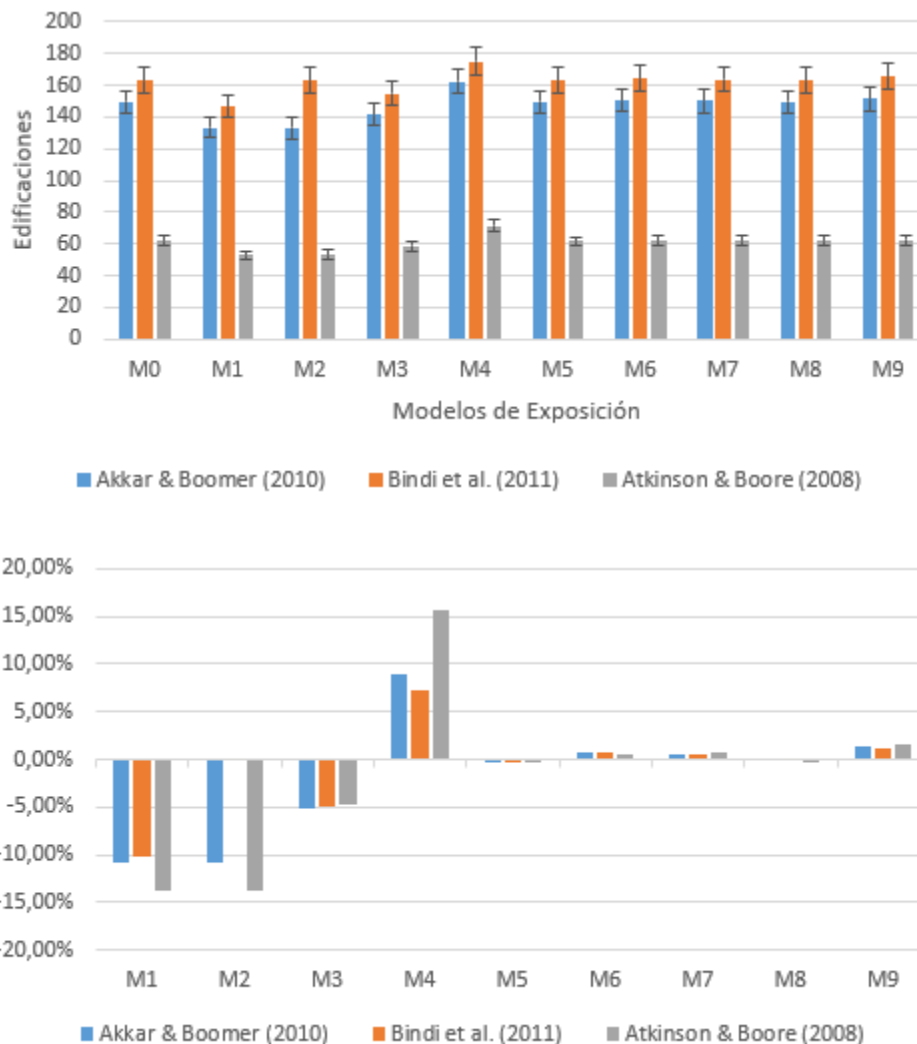
Nota: Se muestran las pérdidas económicas de cada modelo de exposición, de acuerdo a los modelos de movimiento fuerte del terreno o GMPE y la variación porcentual con respecto al modelo inicial o más probable.

En la figura 98 se indican los resultados de las pérdidas económicas de cada modelo de exposición calculado para el Barrio San Enrique de Velasco, utilizando los 3 modelos de movimiento fuerte de terreno, la variación porcentual es mínima e inferior al 7% respecto al modelo inicial en el modelo M4 y en los modelos de exposición restantes, la variación porcentual no supera el 1%, esto debido en parte, a que las curvas de fragilidad en la variación de las tipologías tienen características similares en cuanto a estados de daño con relación a las pérdidas económicas, además de que el costo de reposición de las tipologías que se varió en el modelo de exposición tiene también valores calculados iguales, por ejemplo en el modelo M3 se varía las tipologías MUR+CBH/LWAL/DNO por las tipologías MCF+CBH/LWAL/DNO, los costos de reposición como sus curvas de fragilidad son similares.

En la figura 99 se muestran los resultados de daño completo o colapso de las edificaciones totales en el Barrio San Enrique de Velasco de todos los modelos de exposición con sus respectivas variaciones, se puede identificar que al igual que en las pérdidas económicas las variaciones son mínimas en la mayoría de modelos de exposición, solo en M1 o M2 la variación máxima de las edificaciones es del 13%, esto se debe a que en M1 y M2 se varió la tipología CR+CIP/LFLSINF/DNO del modelo inicial por las tipologías CR+CIP/LFINF/DUC y CR+CIP/LFLSINF/DUC respectivamente, que de acuerdo a sus curvas de fragilidad su probabilidad de exceder un mismo nivel de daño es menor.

Figura 99

Resultados de daño completo o colapsos en edificaciones para un escenario cortical 475 y su variación porcentual.



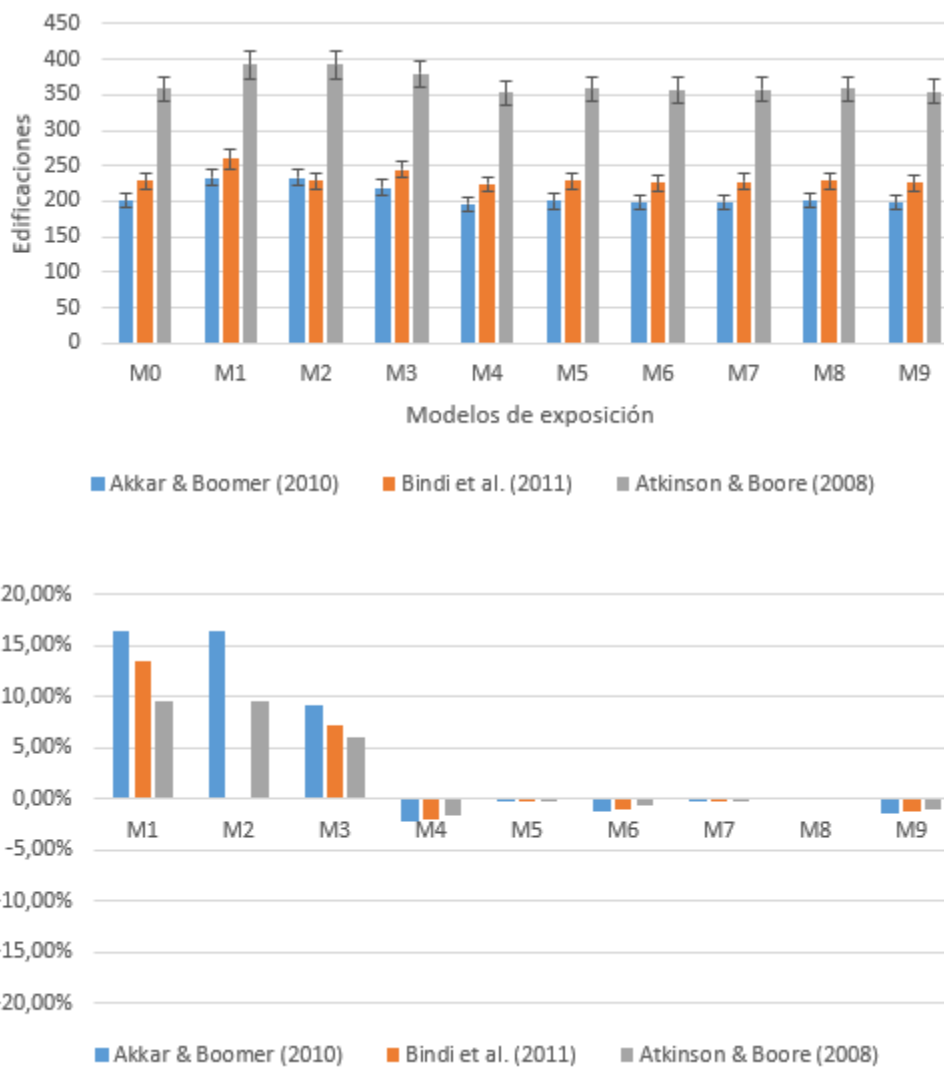
Nota: Se muestra daños completos o colapsos en edificaciones de acuerdo a los modelos de movimiento fuerte del terreno o GMPE y la variación porcentual de edificaciones con respecto al modelo inicial o más probable. Por Elaboración Propia.

Los datos de mayor relevancia en los estados de daño son las edificaciones con probabilidad de alcanzar un estado de daño completo o riesgo de colapso,

adicionalmente se muestra los resultados de los demás estados de daño de las edificaciones considerando la variabilidad de los modelos de exposición.

Figura 100

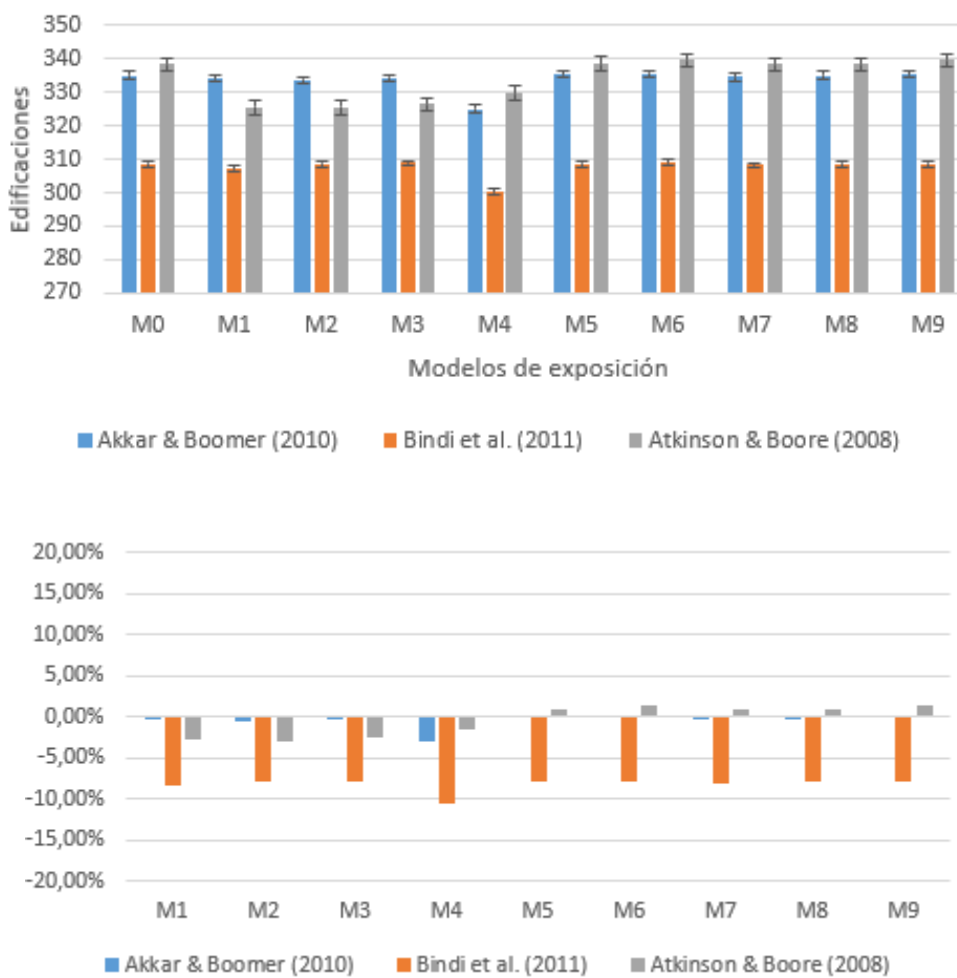
Resultados de edificaciones probables sin daño para un escenario cortical 475. Variación porcentual de edificaciones sin daño con respecto al modelo más probable M0.



Nota: Por elaboración propia.

Figura 101

Resultados de edificaciones con probabilidad de alcanzar o superar daños leves para un escenario cortical 475. Variación porcentual de edificaciones sin daño con respecto al modelo más probable M0.

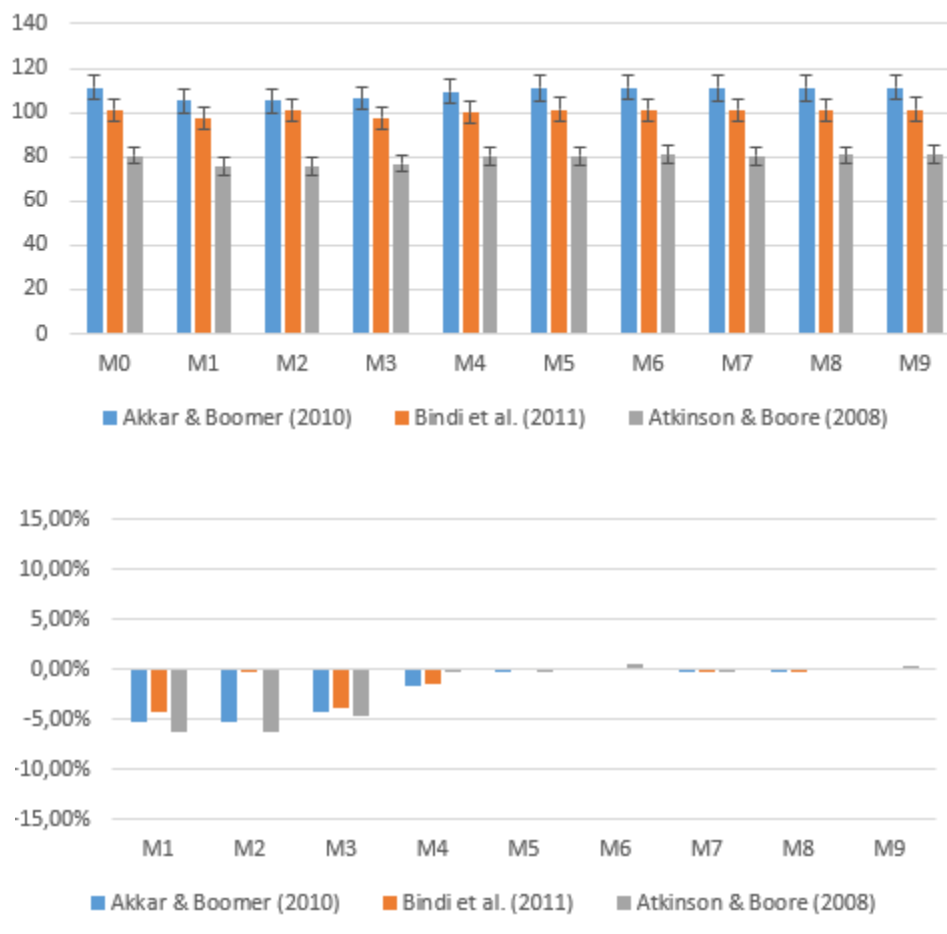


Nota: Por elaboración propia.

La variación con respecto a cada nivel de daño no supera el 10% en los estados de daño leve, moderado y extensivo.

Figura 102

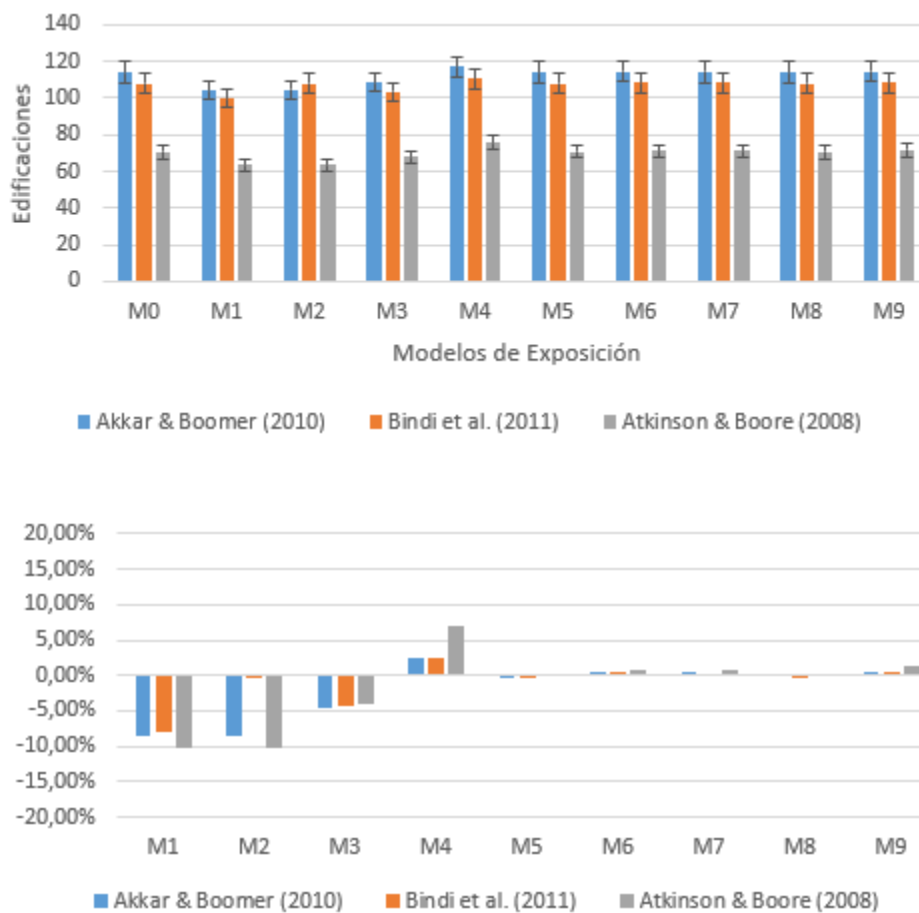
Resultados de edificaciones con probabilidad de alcanzar o superar daños moderados para un escenario cortical 475 y la variación porcentual de edificaciones sin daño con respecto al modelo más probable M0.



Nota: Por elaboración propia.

Figura 103

Resultados de edificaciones con probabilidad de alcanzar o superar daños extensivos para un escenario cortical 475 variación porcentual de edificaciones sin daño con respecto al modelo más probable M0.



Nota: Por elaboración propia.

Capítulo VII

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

Los datos y resultados obtenidos del proyecto son una estimación del riesgo sísmico representado en métricas de daño y pérdidas económicas, considerando varios parámetros de variabilidad e incertidumbre, tanto en el modelo de amenaza como en el modelo de exposición y vulnerabilidad. Dependiendo de las escalas utilizadas y la metodología, los porcentajes de daño pueden variar cuando se considera daños leves o moderados, por tal motivo se hace mayor énfasis en los resultados de cuyas edificaciones podrían alcanzar un estado de daño completo o colapso.

Para el evento sísmico de magnitud $M_w:6.2$ a 15km de profundidad cuya fuente es la falla Ilumbisi la Bota, en base a las ecuaciones de los modelos de atenuación de Akkar & Bommer 2010, Bindi et al. 2011 y Boore & Atkinson 2008 se registran picos de aceleración PGA de 0.43g, 0.45g y 0.28g respectivamente para un período de retorno de 475 años, cuyos valores de aceleraciones esperadas son similares a los valores obtenidos en estudios de peligrosidad sísmica para Quito.

La variabilidad de los modelos de exposición permitió cuantificar la incertidumbre asociada al levantamiento de las características que definen las tipologías estructurales del Barrio San Enrique de Velasco especialmente el sistema de resistencia a cargas laterales que es uno de los datos que más incertidumbre genera en el momento del levantamiento de información, cuya variación no modifica valores como el área construida o los costos de reposición totales del modelo de exposición, esta variación en las tipologías estructurales respecto del modelo más probable o modelo de

exposición inicial genera porcentajes de variación mínima en el cálculo de pérdidas económicas y porcentajes de daño.

Para el modelo de vulnerabilidad se asignaron las curvas de fragilidad, dicha asignación es importante para la validez de los resultados del riesgo sísmico esto depende de que tan adecuadas sean a las tipologías establecidas justificando su aplicabilidad, contando con características similares, para este estudio dentro del OpenQuake se asignó en su mayoría para Villar- Vega (2017) las cuales son aplicables en Ecuador.

Al integrar los modelos de amenaza, exposición y vulnerabilidad, para calcular el riesgo sísmico en términos de pérdidas económicas y daños estructurales se obtuvo que el 13.72% de estructuras podrían alcanzar un estado de daño completo o colapso y las pérdidas económicas por daños estructurales son de 47.9 millones de dólares equivalentes al 53% del costo de reposición, información de importancia para las entidades gubernamentales para futuros planes de contingencia ante la presencia de un evento sísmico.

Recomendaciones

Desarrollar proyectos de vinculación por parte de los estudiantes de ingenierías civil de los semestres superiores en convenio con los municipios para desarrollar modelos de exposición de los diferentes barrios de Quito que sirvan como información base en posteriores estudios de riesgo sísmico o para la estimación de pérdidas económicas y daños estructurales para cualquier escenario sísmico que pueda presentarse para una mejor toma de decisiones.

Desarrollar curvas de fragilidad que sean aplicables a las tipologías encontradas dentro del barrio San Enrique de Velasco especialmente para las tipologías cuyo sistema de resistencia a cargas laterales es del sistema relleno con paredes de mampostería con losa plana o maciza que en un sistema aporticado se lo conoce como sistema de vigas banda.

Considerar el uso de drones para un levantamiento más eficiente de la información necesaria para el modelo de exposición ya que reduce los tiempos de trabajo y tiene ciertas ventajas en el momento de identificar estructuras cuyo acceso y observación puede estar limitado solo a sus propietarios además de proteger la integridad y seguridad de los encuestadores.

Utilizar este estudio de riesgo sísmico del Barrio San Enrique de Velasco como referencia para estudios de riesgos sísmicos para todo el país utilizando una escala de levantamiento de construcciones individuales.

Emplear como calculadora de riesgo sísmico el software OpenQuake, así como también de análisis de amenaza sísmica para barrios, parroquias, ciudades o regiones del Ecuador.

Referencia Bibliográfica

- Aguiar, R., & Chunga, K. (2013). *Microzonación sísmica del Centro Norte de Quito*.
Segunda Jornada de " Investigación científica desde las Aulas (2013).
- Aguiar, R., López, E., & Quizanga, D. (2017). Relaciones V/H para espectros asociados a las fallas inversas de la ciudad de Quito. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, 42, 25–35. <https://doi.org/10.15446/rbct.n42.54922>
- Alvarado, A., Audin, L., Nocquet, J. M., Lagreulet, S., Segovia, M., Font, Y., Lamarque, G., Yepes, H., Mothes, P., Rolandone, F., Jarrín, P., & Quidelleur, X. (2014). Active tectonics in Quito, Ecuador, assessed by geomorphological studies, GPS data, and crustal seismicity. *Tectonics*, 33(2), 67–83. <https://doi.org/10.1002/2012TC003224>
- Barbat, A. H., & Pujades, L. (2004). Evaluación de la Vulnerabilidad y del riesgo sísmico en zonas urbanas. Aplicación a Barcelona. *SÍSMICA 2004 - 6º Congreso Nacional de Sismología e Engenharia Sísmica, 1977*, 229–252.
http://civil.uminho.pt/masonry/Publications/Sismica_2004/229-252 Alex Barbat e Lluís Pujades _24 p_.pdf
- Beauval, C., Yepes, H., Palacios, P., Segovia, M., & Alvarado, A. (2013). *An Earthquake Catalog for Seismic Hazard Assessment in Ecuador*. 103(2), 773–786.
<https://doi.org/10.1785/0120120270>
- Brzev, S., Scawthorn, C., Charleson, A. W., Allen, L., Greene, M., Jaiswal, K., & Silva, V. (2013). GEM Building Taxonomy Version 2.0. *GEM Technical Report, 02*, 188.
- Cabrera, J., & Pérez, D. (2018). *Espectros específicos de desplazamiento para la zona urbana de la ciudad de Quito a partir de ecuaciones empíricas*.
- Calvi, G. M., Pinho, R., Magenes, G., Bommer, J. J., Restrepo-Vélez, L. F., & Crowley, H. (2006). Development of seismic vulnerability assessment methodologies over the past 30 years. *ISET Journal of Earthquake Technology*, 43(3), 75–104.

- Cañizares, Fernando, & Singaicho, J. C. (2018). Equations of Attenuation Compatible with the Quito Fault System GMPEs. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 23(2), 209–226.
- Cañizares, Freddy. (2017). *Selección de ecuaciones de atenuación (GMPEs) compatibles con el sistema de fallas de Quito*.
- Chávez, B. (2016). *Evaluación de la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones de la ciudad de Quito -Ecuador y riesgo de pérdida*.
- Chicaiza, M. (2017). *Modelo de exposición y mapa de vulnerabilidad del Distrito Metropolitano de Quito*. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/17352>
- Ordenanza No. 0093 Municipio de Quito, (2015).
http://www7.quito.gob.ec/mdmq_ordenanzas/Ordenanzas/ORDENANZAS AÑOS ANTERIORES/ORDM-093 - CONTAMINACION VEHICULAR - MEDIO AMBIENTE.pdf
- Ordenanza Metropolitano No. 0196 Municipio de Quito, 53 ORDENANZA No. 0196 Municipio de Quito 1689 (2017).
http://www7.quito.gob.ec/mdmq_ordenanzas/Ordenanzas/ORDENANZAS MUNICIPALES 2017/ORDM - 196 Aprobación Plano Valor Suelo 2018 - 2019.pdf
- Consejo Metropolitano de Quito. (2020). *Código Municipal para el Distrito Metropolitano de Quito Ordenanza Municipal 1*. <http://journal.um-surabaya.ac.id/index.php/JKM/article/view/2203>
- Durukal, E., Erdik, M., & Sesetyan, K. (2006). Expected Earthquake Losses to Buildings in Istanbul and Implications for the Performance of the Turkish Catastrophe Insurance Pool. *Proceedings Geohazards Engineering Conferences International Year*. <http://dc.engconfintl.org/geohazards/34>
- ERN-CAPRA. (2005). Modelos de evaluación de amenazas naturales y selección. In

Informe Técnico ERN-CAPRA.

FEMA P-154. (2015). Rapid visual screening of buildings for potential seismic hazards:

FEMA P-154. *NCEE 2014 - 10th U.S. National Conference on Earthquake*

Engineering: Frontiers of Earthquake Engineering.

<https://doi.org/10.4231/D3M90238V>

GEM. (2015). SARA. <https://sara.openquake.org/>

GEM. (2020). *OpenQuake -Escenario de daños y pérdidas.*

<https://storage.globalquakemodel.org/openquake/about/>

GEM Hazard Blog. (2020). *GEM Global Active Faults | Global Earthquake Model Hazard*

blog. <https://blogs.openquake.org/hazard/global-active-fault-viewer/>

Global Earthquake Model. (2020). *OpenQuake training earthquake scenarios.*

<https://www.training.openquake.org/eq-scenarios>

Gómez, A., & Cuvi, N. (2016). *Asentamientos informales y medio ambiente en Quito.*

<https://revistas.um.es/areas/article/view/279181/204161>

González, D. (2017). *Modelo de exposición sísmica de viviendas de Medellín.*

Google Street View Map. (2020). *Street View Map - Google My Maps.*

[https://www.google.com/maps/d/viewer?msa=0&ie=UTF8&t=h&ll=-](https://www.google.com/maps/d/viewer?msa=0&ie=UTF8&t=h&ll=-0.09988259747735989%2C-78.50946734930264&mid=1JEkfH9bJtMKrVCMHrKGPP_QmMys&z=16)

[0.09988259747735989%2C-](https://www.google.com/maps/d/viewer?msa=0&ie=UTF8&t=h&ll=-0.09988259747735989%2C-78.50946734930264&mid=1JEkfH9bJtMKrVCMHrKGPP_QmMys&z=16)

[78.50946734930264&mid=1JEkfH9bJtMKrVCMHrKGPP_QmMys&z=16](https://www.google.com/maps/d/viewer?msa=0&ie=UTF8&t=h&ll=-0.09988259747735989%2C-78.50946734930264&mid=1JEkfH9bJtMKrVCMHrKGPP_QmMys&z=16)

Guevara, T. (2013). Vivienda popular, autoconstrucción, gestión de organizaciones y financiamiento: dos ejemplos en Quito. In *Jurnal Teknologi* (Vol. 1, Issue 1).

<https://doi.org/10.11113/jt.v56.60>

Hinestroza, J. (2018). *Evaluación del riesgo sísmico de viviendas de Barrancabermeja (Colombia).*

IGEPN. (2016, April 4). *Informe Sísmico Especial N. 18 - 2016 - Instituto Geofísico -*

EPN. <http://www.igepn.edu.ec/1324-informe-sismico-especial-n-18-2016.html>

IGEPN. (2020). *Solicitud de Datos - Instituto Geofísico - EPN*.

<https://www.igepn.edu.ec/ultimos-sismos>

INEC. (2020). *Población y Demografía*. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/censo-de-poblacion-y-vivienda/>

Kaklamanos, J., Baise, L. G., & Boore, D. M. (2011). Estimating unknown input parameters when implementing the NGA ground-motion prediction equations in engineering practice. *Earthquake Spectra*, 27(4), 1219–1235.

<https://doi.org/10.1193/1.3650372>

Molina, M. (2019). *Análisis del peligro sísmico utilizando el método determinista en el sector Pishilata barrio Pasochoa del Cantón Ambato* provincia de Tungurahua*.

<https://idoc.pub/documents/idocpub-en5k2d6e5pno>

Nakano, Y. (1995). *DUCTILIDAD Y DISEÑO ESTRUCTURAL DE LOS EDIFICIOS DE CONCRETO REFORZADO*.

NEC-SE-DS. (2015). *Peligro sísmico*. <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/02/NEC-SE-DS-Peligro-Sísmico-parte-1.pdf>

NEC. (2014). *Mampostería Estructural*. 1–56. <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/08/NEC-SE-MP.pdf>

NEC. (2015). Norma Ecuatoriana de la Construcción - NEC: Riesgo sísmico, evaluación, rehabilitación de estructuras. *ACI Structural Journal*, 1, 4.

<https://doi.org/10.4067/S0717-69962013000200001>

OpenQuake Platform. (2021). *OpenQuake Platform - Vulnerability: cart of user Karol and Antonio*. <https://platform.openquake.org/vulnerability/cart>

Osorio, F. A. (2015). *Modelo de exposición sísmica de viviendas del departamento de Antioquia, Colombia*.

<https://ezproxy.eafit.edu.co/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=ir00174a&AN=eafit.10784.7769&lang=es&site=eds->

live%5Cnhttp://hdl.handle.net/10784/7769

- Parra, H. (2016). *Desarrollos metodológicos y aplicaciones hacia el cálculo de la peligrosidad sísmica en el Ecuador Continental y estudio de riesgo sísmico en la ciudad de Quito.*
- Quinde, P., & Reinoso, E. (2016). Estudio De Peligro Sísmico De Ecuador Y Propuesta De Espectros De Diseño Para La Ciudad De Cuenca. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 26(94), 1–26. <https://doi.org/10.18867/ris.94.274>
- Quizanga, D. (2015). *Espectros Específicos para la ciudad de Quito en función de las Fallas Ciegas Inversas.*
- Rivas, A., Aguiar, R., & Benito, B. (2014). Determinación el 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. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 192(December), 203–221.
- Salvador, M., Larrea, C., Belmont, P., & Baroja, C. (2014). Un índice difuso de Niveles socioeconómicos en Quito. *Economic Mobility and the Rise of the Latin American Middle Class*, 34(1). <https://doi.org/10.1596/978-0-8213-9634-6>
- Silva, J. (2017). *Guía de reforzamiento para estructuras informales aporticadas según estudio de vulnerabilidad en el Distrito Metropolitano de Quito.*
- Valverde, J., Fernández, J., Jiménez, E., Vaca, T., & Alarcón, F. (2002). *Microzonificación sísmica de los suelos del Distrito Metropolitano de la Ciudad de Quito.*
- Vásquez, C. (2015). Análisis del desempeño sísmico del edificio Peña aplicando la norma ecuatoriana de la construcción 2011 vigente en el Distrito Metropolitano de Quito en el año 2015. In *Universidad Privada del Norte.*
- Villar-Vega, M., Silva, V., Crowley, H., Yepes, C., Tarque, N., Acevedo, A. B., Hube, M. A., Gustavo, C. D., & María, H. S. (2017). Development of a fragility model for the

residential building stock in South America. *Earthquake Spectra*, 33(2), 581–604.

<https://doi.org/10.1193/010716EQS005M>

Anexos

Anexo 1. Modelo de variabilidad de la amenaza sísmica en el software OpenQuake

Anexo 2. Calificación de los acabados según la Ordenanza No. 0196 del Municipio de Quito del 2017.

Anexo3. Resultados de los modelos de exposición de acuerdo a la matriz de variación.

Anexo 4. Curvas de fragilidad desarrolladas por Villar-Vega et al., (2017).