



Departamento de Ingeniería Topográfica y Cartografía

Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID**

PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA GEOGRÁFICA

**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.**

TESIS DOCTORAL

Autor:

**Humberto Aníbal Parra Cárdenas**

Tcrnl. Ingeniero Geógrafo y del Medio Ambiente

Directora:

**Dra. María Belén Benito Oterino**

Dra. en Ciencias Físicas

**2016**



Tribunal nombrado por el Sr. Rector Magnífico de la Universidad Politécnica de Madrid, el día 18 de enero de 2016

Presidente:

D. Ramón Capote del Villar

Secretario:

D. Jorge Miguel Gaspar Escribano

Vocales:

Da. Sandra Martínez Cuevas

D. Julián García Mayordomo

D. Alfonso Rodrigo Tierra Criollo

Suplentes:

D. José Jesús Martínez Díaz

D. José Manuel Martínez Solares

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día 26 de enero de 2016 en la E. T. S. I. en Topografía, Geodesia y Cartografía de la Universidad Politécnica de Madrid.



## RESUMEN.

En el presente trabajo de tesis se desarrolla, en primer lugar, un estudio de peligrosidad sísmica en Ecuador continental, siguiendo una metodología probabilista zonificada. El estudio se plantea a escala regional y presenta como principales aportaciones: 1) la elaboración de un Estado del Arte sobre Tectónica y Geología de Ecuador, concluyendo con la identificación de las principales fuentes sísmicas; 2) La confección de un Catálogo Sísmico de proyecto, recopilando información de distintas agencias, que ha sido homogeneizado a magnitud momento,  $M_w$ , depurado de réplicas y premonitores y corregido por la falta de completitud para la estimación de tasas en diferentes rangos de magnitud; 3) la propuesta de un nueva zonificación sísmica, definiendo las zonas sismogénicas en tres regímenes tectónicos: cortical, subducción interfase y subducción in-slab; 4) la caracterización sísmica de cada zona estimando los parámetros de recurrencia y Magnitud Máxima ( $M_{max}$ ), considerando para este último parámetro una distribución de valores posibles en función de la sismicidad y tectónica, tras un exhaustivo análisis de los datos existentes; 5) la generación de mapas de peligrosidad sísmica de Ecuador continental en términos de aceleración pico (PGA) y espectral SA ( $T=1s$ ), en ambos casos para periodos de retorno (PR) de 475, 975 y 2475 años; 6) La estimación de espectros de peligrosidad uniforme (UHS) y sismos de control mediante desagregación de la peligrosidad, para PR de 475 y 2475 años en 4 capitales de provincia: Quito, Esmeraldas, Guayaquil y Loja.

Una segunda parte del trabajo se destina al cálculo del riesgo sísmico en el Barrio Mariscal Sucre de Quito, lo que supone incidir ya a una escala municipal. Como principales contribuciones de este trabajo se destacan: 1) definición del escenario sísmico que más contribuye a la peligrosidad en Quito, que actuará como input de cálculo del riesgo; 2) caracterización de la acción sísmica asociada a ese escenario, incluyendo resultados de microzonación y efecto local en la zona de estudio; 3) Elaboración de una Base de Datos partiendo de información catastral e identificación de las tipologías dominantes; 4) Asignación de clases de vulnerabilidad y obtención de porcentajes de daño esperado en cada clase ante la acción sísmica definida previamente, con la consiguiente representación de mapas de vulnerabilidad y daño; 5) mapas de indicadores globales del riesgo sísmico; 6) Base de datos georreferenciada con toda la información generada en el estudio.

Cabe destacar que el trabajo, aunque no formula nuevos métodos, si plantea una metodología integral de cálculo del riesgo sísmico, incorporando avances en cada fase abordada, desde la estimación de la peligrosidad o la definición de escenarios sísmicos con carácter híbrido (probabilista-determinista), hasta la asignación de vulnerabilidades y estimación de escenarios de daño. Esta tesis trata de presentar contribuciones hacia el mejor conocimiento de la peligrosidad sísmica en Ecuador y el riesgo sísmico en Quito, siendo uno de los primeros estudios de tesis que se desarrolla sobre estos temas en el país. El trabajo puede servir de ejemplo y punto de partida para estudios futuros; además de ser replicable en otras ciudades y municipios de Ecuador.



## ABSTRACT:

This thesis first develops a study of seismic hazard in mainland Ecuador, following a zoned, probabilistic methodology. The study considers a regional scale and presents as main contributions: 1) The development of a State of Art on the Tectonics and Geology of Ecuador, concluding with the identification of the main seismic sources; 2) The creation of a Seismic Catalog project, collecting information from different agencies, which has been homogenized to Moment magnitude,  $M_w$ , purged from aftershocks and premonitories and corrected for the lack of completeness to estimate rates in different magnitude ranges; 3) The proposal of a new seismic zoning, defining the seismogenic zones in three tectonic regimes: cortical, subduction interface and subduction in-slab; 4) The seismic characterization of each zone, estimating the parameters of recurrence and Maximum Magnitude ( $M_{max}$ ), considering the latter as a distribution of possible values, depending on the seismicity and tectonics, and after a thorough analysis of the existing data; 5) Seismic hazard maps of continental Ecuador in terms of peak ground acceleration (PGA) and spectral  $SA(T=1)$ , and return periods (PR) of 475, 975 and 2475 years; 6) Uniform hazard spectra (UHS) and control earthquakes obtained by hazard disaggregation, for PR 475 and 2475 years in four provincial capitals: Quito, Esmeraldas, Guayaquil and Loja.

The second section focuses on the calculation of seismic risk in the Quito Mariscal Sucre parish, which is already supposed to be influencing at a municipal level. The main contributions here are the: 1) Definition of the seismic scenario that contributes most to the hazard in Quito, which acts as an input in the risk calculation; 2) Characterization of the seismic action associated with that scenario, including results of micro-zoning and local effect in the study area; 3) Development of a database, based on cadastral data and identification of key typologies; 4) Allocation of vulnerability classes and obtaining percentages of damage expected in each class faced with the seismic action previously defined, with the consequent representation of maps of vulnerability and damage; 5) Global maps of seismic risk indicators; 6) Geo-referenced database with all the information generated in the study.

It should be noted that although new methods are not prescribed, this study does set a comprehensive methodology for the calculation of seismic risk, incorporating advances in each phase approached, from the hazard estimation, or definition of seismic scenarios applying a hybrid (deterministic-probabilistic) method, to the allocation of vulnerabilities and estimation of damage scenarios. This thesis aims to present contributions leading to a better understanding of seismic hazard in Ecuador and seismic risk in Quito, and is one of the first studies in the country to develop such themes. This study can serve as an example and starting point for future studies, which could replicate this methodology in other cities and municipalities.



Quiero dedicar este trabajo

A Dios, que me ha dado la fortaleza y  
ha guiado mi camino para terminar  
este proyecto.

A mi familia, que ha sido mi apoyo  
emocional en todo momento.

A mi padre, por enseñarme a soñar,  
crecer y luchar para alcanzar mis  
objetivos.



## AGRADECIMIENTOS

Expreso mi sincero agradecimiento a mi directora de tesis, Dra. María Belén Benito Oterino, que desde el primer momento confió en mí y me ha brindado su apoyo incondicional en todo momento.

A los integrantes del Grupo de Investigación de Ingeniería Sísmica, por su sincera amistad y su colaboración constante para hacer que lo difícil se haga llevadero y se convierta en una experiencia gratificante.

Al profesor Antonio Vázquez, por ayudarme desde el primer contacto con la Universidad y estar pendiente de mi estancia hasta el final de la elaboración del presente proyecto.

A mis amigos, que desde Ecuador han estado siempre pendientes de mí, gracias por su paciencia y colaboración.

## ÍNDICE.

<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 ESTRUCTURA DE LA TESIS.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2 MOTIVACIÓN.....</b>	<b>4</b>
1.2.1 Peligrosidad sísmica.....	4
1.2.2 Riesgo sísmico.....	6
<b>1.3 OBJETIVOS DEL ESTUDIO.....</b>	<b>9</b>
1.3.1 Objetivo principal.....	9
1.3.2 Objetivos específicos.....	9
1.3.2.1 Para el cálculo de la peligrosidad sísmica.....	9
1.3.2.2 Para el cálculo del riesgo sísmico.....	10
<b>1.4 ALCANCE DEL ESTUDIO.....</b>	<b>10</b>
<b>CAPÍTULO 2 – MARCO METODOLÓGICO.....</b>	<b>13</b>
<b>2.1 PELIGROSIDAD SÍSMICA.....</b>	<b>15</b>
2.1.1 Fundamento y definiciones.....	15
2.1.2 Métodos de cálculo.....	16
2.1.3 Representación de resultados.....	19
2.1.4 Fases de cálculo.....	21
2.1.4.1 Catálogo de proyecto.....	21
2.1.4.2 Zonificación sísmica y caracterización de la sismicidad.....	24
2.1.4.3 Atenuación de ondas sísmicas.....	27
2.1.4.4 Efecto local.....	28
2.1.5 Cuantificación de incertidumbres.....	28
<b>2.2 RIESGO SÍSMICO.....</b>	<b>29</b>
2.2.1 Definición y fundamentos.....	29
2.2.2 Metodologías.....	30
2.2.3 Fases de cálculo.....	31
2.2.3.1 Caracterización del escenario de peligrosidad sísmica.....	32
2.2.3.2 Estudio de la vulnerabilidad.....	33
2.2.3.2.1 Curvas de capacidad.....	34
2.2.3.2.2 Curvas de fragilidad.....	35
2.2.3.3 Cálculo de demandas de desplazamientos.....	36
2.2.4 Estimación del grado de daño.....	38
<b>CAPITULO 3 – MARCO TECTÓNICO Y GEOLÓGICO.....</b>	<b>41</b>
<b>3.1 INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>43</b>
<b>3.2 PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS TECTÓNICAS.....</b>	<b>44</b>
3.2.1 Placa de Nazca.....	45
3.2.2 Cordillera submarina de Carnegie.....	46
3.2.3 Fosa de subducción.....	47
3.2.4 Geometría de la subducción.....	49
3.2.5 Bloque Norandino.....	52
3.2.6 Golfo de Guayaquil.....	54

<b>3.3 PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS.....</b>	<b>54</b>
3.3.1 Región Costa o llanura costera.....	56
3.3.2 Región montañosa o Cordillera de los Andes.....	57
3.3.2.1 Cordillera Occidental.....	58
3.3.2.2 Valle Interandino.....	58
3.3.2.3 Cordillera Oriental o Real.....	59
3.3.2.4 Región Oriental o Cuenca del Amazonas.....	59
<b>CAPITULO 4 – ESTIMACIÓN DE LA PELIGROSIDAD SÍSMICA EN ECUADOR.....</b>	<b>61</b>
<b>4.1 INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>63</b>
<b>4.2 IDENTIFICACIÓN DE FUENTES SÍSMICAS.....</b>	<b>64</b>
<b>4.3 PREPARACIÓN DE INPUTS DE CÁLCULO.....</b>	<b>66</b>
4.3.1 Elaboración del catálogo sísmico.....	66
4.3.2 Propuesta de zonas sismogénica para el cálculo de la peligrosidad sísmica.....	80
4.3.2.1 Zonificación cortical.....	84
4.3.2.2 Planteamiento de la geometría de la subducción.....	91
4.3.2.3 Zonificación en subducción.....	94
4.3.3 Estimación de los parámetros de sismicidad.....	96
4.3.4 Selección de modelos de atenuación.....	102
<b>4.4 ESTIMACIÓN DE LA PELIGROSIDAD EN ECUADOR.....</b>	<b>103</b>
4.4.1 Especificaciones del cálculo.....	104
4.4.2 Resultados.....	105
4.4.2.1 Mapas de peligrosidad.....	105
4.4.2.2 Resultados específicos para cuatro capitales de provincia.....	108
<b>4.5 DISCUSIÓN.....</b>	<b>112</b>
<b>CAPÍTULO 5 – ESTIMACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO EN LA PARROQUIA MARISCAL SUCRE (QUITO).....</b>	<b>115</b>
<b>5.1 INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>117</b>
<b>5.2 ELABORACIÓN DE LA BASE DE DATOS GEORREFERENCIADA.....</b>	<b>117</b>
5.2.1 Análisis de las características de las edificaciones.....	120
<b>5.3 ESCENARIO DE PELIGROSIDAD SÍSMICA.....</b>	<b>124</b>
5.3.1 Identificación del escenario sísmico.....	124
5.3.2 Caracterización de la acción sísmica.....	125
<b>5.4 CLASIFICACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE LA VULNERABILIDAD.....</b>	<b>129</b>
5.4.1 Identificación de tipologías constructivas.....	129
5.4.2 Asignación de vulnerabilidad.....	132
5.4.3 Curvas de capacidad.....	134
5.4.4 Aplicación del método de Coeficiente de Desplazamiento Mejorado.....	140
5.4.5 Curvas de fragilidad.....	143
5.4.6 Estimación de las probabilidades de daño.....	146
5.4.7 Análisis de los resultados de daño obtenidos.....	148
5.4.8 Estimación de otros indicadores del riesgo.....	154
5.4.8.1 Estimación del número de edificaciones de cada tipología por estado de daño.....	154
5.4.8.2 Estimación del número de edificaciones inhabitables.....	160

<b>5.5 DISCUSIÓN.....</b>	<b>161</b>
<b>CAPÍTULO 6 - RESUMEN Y CONCLUSIONES / LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO.....</b>	<b>163</b>
<b>6.1 RESUMEN Y CONCLUSIONES.....</b>	<b>165</b>
<b>6.2 LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO.....</b>	<b>169</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>171</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>181</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>185</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>187</b>
ANEXO 1. AJUSTE Y PARÁMETROS DE SISMICIDAD.....	189
ANEXO 2. ESTIMACIÓN DE LA MAGNITUD MÁXIMA .....	195
ANEXO 3. ARCHIVO FOTOGRÁFICO DE LAS EDIFICACIONES EN LA ZONA DE ESTUDIO.....	207
ANEXO 4. ESTIMACIÓN DE LA ACCELERACIÓN ESPECTRAL MÁXIMA Y DESPLAZAMIENTO ESPECTRAL PICO.....	219
ANEXO 5. PROBABILIDADES DE DAÑO EN LAS CLASES DE VULNERABILIDAD IDENTIFICADAS PARA EL ESCENARIO SÍSMICO DEFINIDO.....	231

# **Capítulo 1**

## **INTRODUCCIÓN**



## 1.1 ESTRUCTURA DE LA TESIS

Esta tesis doctoral se ha estructurado en 6 capítulos, que se describen brevemente a continuación y se desarrollan a lo largo de la memoria.

El **Capítulo 1** constituye una Introducción de la temática de tesis, exponiendo en primer lugar la motivación del trabajo, que reside esencialmente en la elevada peligrosidad y riesgo sísmico de Ecuador, lo que hace aconsejable fomentar estudios hacia una mejora del conocimiento en ambos temas, con la consiguiente adopción de medidas de mitigación. A continuación se formulan los objetivos generales y específicos del estudio, para concluir con una descripción del alcance del trabajo.

El **Marco Metodológico** del estudio se describe en el **Capítulo 2**. En él se presentan los fundamentos, definiciones y metodologías de cálculo de los conceptos clave que se abordan en esta tesis: la Peligrosidad y el Riesgo sísmico. Se dedica especial atención a la descripción teórica de las fases a seguir en los correspondientes estudios, cuya aplicación práctica será descrita en sucesivos capítulos.

En el **Capítulo 3** se describe el **Marco Tectónico y Geológico** de la Zona de estudio, presentando una síntesis del Estado del Arte actualizado, tras recopilar, analizar y extraer las principales conclusiones sobre los trabajos publicados al respecto. Se han tratado de incorporar todas las referencias existentes sobre Tectónica y Geología de Ecuador.

El **Capítulo 4** se centra en el cálculo de la **Peligrosidad en Ecuador Continental**, presentando las fases seguidas y los resultados parciales obtenidos con cada una de ellas, así como los resultados finales, que esencialmente son mapas de peligrosidad para todo el territorio y espectros de peligrosidad uniforme y sismos de control en 4 capitales de provincia: Quito, Esmeraldas, Guayaquil y Loja.

En el **Capítulo 5** se aborda el cálculo del **Riesgo Sísmico** en la parroquia Mariscal Sucre, en **Quito**, lo que supone ya un cambio de escala respecto a la manejada en el estudio de peligrosidad, pasando de una escala regional a otra municipal. Se definen los escenarios sísmicos derivados del cálculo previo de peligrosidad, se desarrolla el análisis de vulnerabilidad para edificaciones de uso residencial ubicadas en la región de estudio y se realiza el cálculo de las probabilidades de daño para diferentes tipologías o clases de vulnerabilidad identificadas, así como de otros indicadores globales del riesgo. Todo ello ha requerido la construcción de un Sistema de Información Geográfica, que se inicia recopilando los datos catastrales y se alimenta después de capas de información que se van generando en las sucesivas fases de cálculo, hasta obtener los mapas finales de representación del riesgo.

El **Capítulo 6** presenta un resumen con las principales **Conclusiones** del estudio realizado en este trabajo de tesis, que finaliza con la exposición de futuras líneas de investigación identificadas.

Finalmente se incluye un apartado de **Referencias**.

Esta tesis ha requerido el manejo y generación de gran cantidad de datos, que pueden resultar de utilidad para estudios futuros, lo que ha llevado a incluir información complementaria y de detalle en **5 Anexos**.

El **Anexo 1** contiene el **Ajuste y cálculo de parámetros de sismicidad** para cada una de las zonas sismogénicas definidas, en los tres regímenes tectónicos identificados: cortical, subducción interfase y subducción in-slab (Capítulo 4).

El **Anexo 2** ilustra el proceso seguido para la estimación de **Distribuciones de magnitud máxima**,  $M_{max}$  en cada zona (Capítulo 4).

En el **Anexo 3** se incluye un **Archivo fotográfico de las tipologías identificadas** en la parroquia Mariscal Sucre, donde se efectúa el cálculo del riesgo sísmico, indicando además la clase de vulnerabilidad asignada (Capítulo 5).

El **Anexo 4** contiene las **Curvas de demanda**, que representan la acción sísmica, y **Curvas de capacidad**, relacionadas con el comportamiento de las distintas clases de vulnerabilidad. La relación entre ambas curvas proporciona los parámetros para el cálculo de probabilidades de daño haciendo uso de las curvas de fragilidad (Capítulo 5).

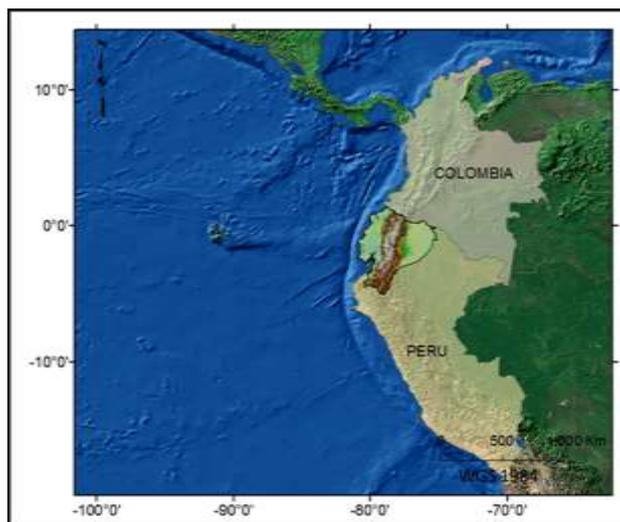
Finalmente, el **Anexo 5** muestra las **Curvas de fragilidad** empleadas, los parámetros estimados a partir de las curvas de capacidad y demanda que constituyen el input en las curvas de fragilidad y los **porcentajes de daño** alcanzados para cada clase de vulnerabilidad en cada barrio (Capítulo 5).

## 1.2 MOTIVACIÓN.

### 1.2.1 PELIGROSIDAD SÍSMICA.

Ecuador se encuentra localizado en el cinturón de fuego del Océano Pacífico, al noroccidente de Sudamérica (Figura 1.1). Siendo uno de los países más densamente poblados de la región, muestra actividad sísmica causada principalmente por la subducción de la Placa Oceánica de Nazca y la presencia de un complejo sistema de fallas activas locales.

El evento de mayor magnitud, que ha sido registrado ya en época instrumental, ocurrió en 1906, con una magnitud estimada de  $M_w$  8.8, localizado en la costa del país. En la Cordillera de los Andes han ocurrido eventos superficiales, que siendo de menor magnitud, han causado grandes pérdidas humanas y materiales al localizarse sus epicentros cerca de grandes ciudades (IGM, 2013; INEC, 2015). Un patrón similar se observa en toda la parte Oeste del continente Centro y Sudamericano, donde los eventos superficiales de corteza son generalmente más destructivos que los de subducción, si bien éstos en ocasiones han venido acompañados de tsunamis que han causado grandes catástrofes.



**Figura 1.1:** Ubicación del Ecuador.

Con el propósito de disminuir los efectos causados por la amenaza sísmica que afecta a Ecuador, en el año 1952 se publica, con el carácter de cumplimiento obligatorio, el Código Nacional de la Construcción, en el que se especifican las reglas para el diseño sismorresistente. Posteriormente, en diciembre de 1976, se publica la Guía Popular de Construcciones Sismorresistentes como un complemento del nuevo Código Ecuatoriano de la construcción CEC 77, guía que está basada en el código anterior y en el documento ACI 318-71 (American Concrete Institute-Detroit-Michigan). En el año 2001 se publica el Código Ecuatoriano de la Construcción, cuyo objetivo principal es establecer especificaciones para el diseño de estructuras propensas a los efectos de terremotos en el transcurso de su vida útil, incluyendo, por primera vez, un mapa de zonificación sísmica para Ecuador. Dicho código también se establece como de cumplimiento obligatorio (CEC 2001).

El resultado del estudio más reciente de peligrosidad sísmica publicado en Ecuador, corresponde al mapa de zonas sísmicas de la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-11, 2011), realizado con un enfoque probabilista para un 10% de probabilidad de excedencia en 50 años o período de retorno de 475 años (Beauval et al., 2014). Este mapa presenta valores esperados de aceleración pico (PGA) en roca y distingue, en base a esos valores, 6 zonas sísmicas en las que la PGA abarca un rango desde 0.15 g (en el nor-orienté del país), hasta valores superiores a 0.50 g (en el litoral ecuatoriano), siendo éste su valor de saturación. Las poblaciones ecuatorianas que se encuentran en el litoral, aunque resultaran inicialmente con mayores aceleraciones, adoptan el valor de 0.50 g como aceleración de cálculo (NEC-11, 2011).

Los países limítrofes con Ecuador han elaborado y publicado sus mapas de peligrosidad sísmica en sus respectivas normas. Colombia dispone de una Norma Sismorresistente publicada en el 2010 (NSR-10) y Perú se rige por la Norma Técnica de Edificación E.030 "Diseño Sismorresistente" contenida en el Reglamento Nacional de Edificaciones, publicado en 2006 (Norma E.30). Sin embargo, a pesar de ser países limítrofes con Ecuador, no se observa una relativa continuidad en los valores de aceleración presentados en las tres normas.

En relación a los estudios realizados sobre modelización de zonas sismogénicas, Aguiar (2013, comunicación personal) propone una zonificación sismogénica para regímenes cortical y de subducción, actualizando el trabajo de Aguiar et al. (2009). Alvarado (2012) publica una propuesta de zonificación sísmica para los dos regímenes y finalmente Chunga

(2010) plantea una zonificación del régimen cortical basada en la integración de datos geológicos, sismológicos y morfoestructurales.

Al no disponer de publicaciones sobre estudios de peligrosidad en los que se utilicen los mencionados modelos de zonas fuentes, no se ha podido realizar un análisis de los parámetros de sismicidad que las caracterizan, ni de la estimación de la magnitud máxima en cada una de ellas, con los correspondientes criterios para su delimitación.

El conocimiento de la ocurrencia de eventos sísmicos en Ecuador en época instrumental, es reportado en los informes de agencias de monitoreo internacionales y a nivel local por el Instituto Geofísico de la Politécnica Nacional de Quito, que inicia su trabajo en 1990. Este Instituto publica, en agosto de 2013, el “Catálogo completo de los sismos ocurridos en el Ecuador” en su página institucional. Dicho catálogo corresponde al estudio realizado por Beauval et al. (2013) y cubre un período desde el año 1587 hasta 2009 (ambos inclusive).

En la actualidad, no se dispone de datos acelerométricos para el planteamiento de modelos de atenuación locales ni para la calibración de modelos foráneos. Por ello, para realizar un estudio de peligrosidad sísmica, se requerirá la selección de modelos de predicción del movimiento fuerte planteados para otras zonas del mundo, que se adapten de una mejor manera al ambiente geotectónico observado en el Ecuador.

En 1993 se publica el Mapa Geológico de la República del Ecuador, que durante los últimos años se encuentra en proceso de actualización. Una versión de esta actualización fue entregada para el presente estudio en marzo de 2014 por el Instituto Nacional de Investigación Geológica, Minero y Metalúrgico del Ecuador (INIGEMM).

Una primera motivación de este estudio es el análisis actualizado y la integración de los datos existentes y de los trabajos publicados, así como la generación de los inputs necesarios para el cálculo de la peligrosidad, esencialmente un catálogo sísmico, una nueva zonificación y los parámetros que definen el patrón de sismicidad de cada zona. Con estas aportaciones, se desarrollará un nuevo cálculo de la peligrosidad en Ecuador, con el fin de contribuir a una mejora del conocimiento en este campo.

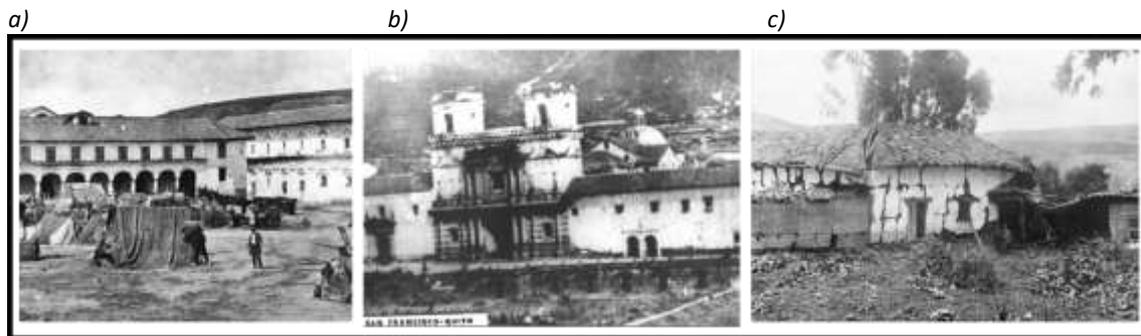
### **1.2.2 RIESGO SÍSMICO.**

La ciudad de Quito es la capital de la República del Ecuador, localizada en la región Interandina a una altura promedio de 2850 metros sobre el nivel del mar, al Norte de la Cordillera de los Andes. Tiene una población de 2.2 millones de habitantes, distribuida en 33 parroquias rurales y 32 parroquias urbanas (INEC, 2015; MDMQ, 2015).

Estudios de sismicidad muestran que cada 50 años (en promedio), se han producido terremotos con epicentros localizados a diferentes distancias de la ciudad, que han ocasionado importantes daños en la misma (Valverde et al., 2002; Del Pino y Yepes 1990). Entre ellos cabe mencionar los ocurridos en 1587, 1797, 1859, y 1868, con valores estimados de magnitud momento Mw 6.4, 7.6, 7.2 y 7.3, respectivamente (Alvarado, 2012; Beauval et al., 2010; Rivadeneira et al., 2007).

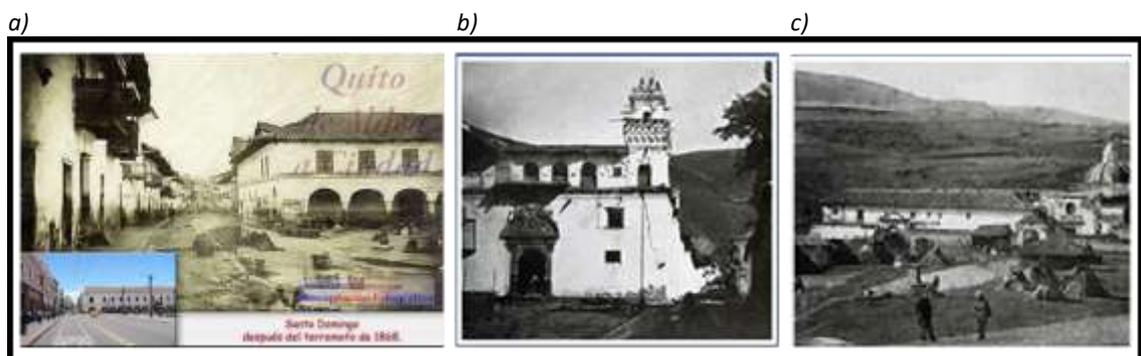
El escenario de un posible evento que afecte a Quito se hace aún más crítico cuando se considera, además, que en las últimas décadas se ha incrementado considerablemente la población de la ciudad, así como su parque inmobiliario (INEC, 2015).

Uno de los sismos que más daño ha causado, fue el ocurrido en marzo de 1859, al noroccidente de la ciudad capital, que ocasionó la muerte de 30 personas y notables daños materiales en edificaciones (Aguiar, 2013) (Figura 1.2).



**Figura 1.2:** Fotografías de Quito tras el terremoto de 1859. a) Albergues temporales en la Plaza de Santo Domingo; b) Daños registrados en las cúpulas de la Iglesia de San Francisco; c) Destrucción de una vivienda de estructura de adobe (tomadas de: Aguiar, 2013).

Otro de los sismos históricos importantes fue el ocurrido en agosto de 1868, en las cercanías de la ciudad de Ibarra, al Norte de Quito. Los daños ocasionados en la ciudad se aprecian en la (Figura 1.3).



**Figura 1.3:** Fotografías de Quito tras el terremoto de 1868. a) Fotografía de la Plaza de Santo Domingo en el centro de Quito; en la parte inferior izquierda se observa su estado actual; b) Iglesia de Santa Clara con daños en el campanario (fue necesaria su demolición); c) Refugios con chozas improvisadas en la Plaza La Recoleta (tomadas de: Atlas de Amenazas Naturales y Exposición de Infraestructura del Distrito Metropolitano de Quito, 2014).

Con estos antecedentes, en 1992 el Ilustre Municipio del Distrito Metropolitano de Quito inicia un proyecto destinado al manejo de riesgo por terremotos en la ciudad, que culmina en 1994. Uno de los objetivos del estudio fue presentar escenarios de riesgo sísmico, simulados a partir de un terremoto cortical teórico, localizado a 25 km de la ciudad, considerando únicamente los sectores más poblados en aquella época y utilizando relaciones de atenuación basadas en información macrosísmica de terremotos ocurridos en el pasado. El proyecto establece 9 tipos predominantes de edificación y los subdivide en 3 categorías, de acuerdo a su altura (hasta 3 pisos, de 4 a 7 pisos y sobre 7 pisos). Para determinar la vulnerabilidad estructural utiliza las recomendaciones del ATC-22 (1989), mientras la estimación del daño esperado se realiza con el método de matrices de probabilidad de daño del ATC-13 (1985) (ERN-AL, 2012; Chatelain et al., 1999).

En los últimos años se han publicado numerosos estudios sobre diferentes aspectos que confluyen en la estimación del riesgo en Quito: fallas activas, microzonación, información

catastral, etc. Los resultados de esos estudios permiten ahondar en una mejor caracterización del riesgo sísmico que afecta a la capital de Ecuador.

En cuanto a la determinación de fallas activas localizadas en el distrito metropolitano, Alvarado et al. (2014) publican su estudio de tectónica activa en Quito, donde se realiza un análisis del sistema de fallas en la ciudad, para finalmente caracterizar y proporcionar información relacionada a cinco segmentos de fallas.

En relación a estudios de microzonación, que constituyen uno de los aspectos determinantes en la estimación del riesgo, se puede mencionar el estudio ejecutado en Quito por la Escuela Politécnica Nacional en 1994, en el que se delimitaron 20 zonas con diferente tipo de suelo (Aguar, 2013); o el de Valverde et al. (2002), que diferencian tres tipos de suelo, variando de S1 (roca o suelo firme) a S3 (suelos blandos) conforme a la clasificación incluida en el Código Ecuatoriano de la Construcción de 2001.

Posteriormente, en el año 2011 se realiza el estudio para la ruta del Metro en la ciudad capital, presentando resultados de 20 perforaciones a lo largo del eje vial propuesto (ERN-AL, 2012).

En el año 2012, como parte del Programa para la Reducción de Riesgos Urbanos en el Distrito Metropolitano de Quito, el Consorcio Evaluación de Riesgos Naturales-América Latina presenta los resultados de su trabajo, denominado Microzonificación Sísmica del Distrito Metropolitano de Quito. En su reporte final llegan a determinar zonas de comportamiento homogéneo, asociadas a puntos específicos, en los cuales se dispone de información estratigráfica y de velocidad de ondas de cizalla (ERN-AL, 2012).

Finalmente, con el propósito de generar información catastral relacionada con la identificación de tipologías del parque inmobiliario, así como con la valoración de los bienes de esta naturaleza, el Municipio de Quito dispone en su organización administrativa de la Dirección Metropolitana de Catastro, que es la encargada de actualizar, automatizar y gestionar éstas bases de datos.

Con la información disponible y dada la alta peligrosidad sísmica a la que se ve expuesta la ciudad capital, que ha sido constatada por las pérdidas humanas y materiales documentadas en reportes históricos, se plantea la conveniencia de desarrollar nuevos estudios de riesgo sísmico que integren el estado del conocimiento actual y utilicen, además, metodologías recientes y acordes a la información disponible, con el fin de generar resultados sobre pérdidas esperadas por terremotos futuros que ayuden en la toma de decisiones, gestión local y gubernamental en este campo.

## **1.3 OBJETIVOS DEL ESTUDIO.**

### **1.3.1 OBJETIVOS PRINCIPAL.**

Este trabajo de tesis se concibe con dos objetivos principales: 1) el cálculo de la Peligrosidad Sísmica en Ecuador continental y 2) Estimación del riesgo sísmico para las estructuras de uso habitacional ubicadas en la parroquia urbana Mariscal Sucre de la ciudad de Quito. El estudio se basa en el análisis y conveniente integración de metodologías desarrolladas en cada una de las fases de cálculo, previa verificación de su aplicabilidad en el área de estudio, considerando: las características naturales de la región, disponibilidad de información básica, estudios científicos publicados sobre la temática y uso de aplicaciones informáticas específicas para procesar la información y realizar los cálculos correspondientes.

### **1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.**

#### **1.3.2.1 En relación al cálculo de la peligrosidad sísmica.**

En el marco de la peligrosidad sísmica, se desglosan los siguientes objetivos específicos:

1. Recopilación y análisis de la información tectónica, geológica y geofísica existente y actualización del estado del arte
2. Generación de un Catálogo Sísmico de Proyecto actualizado y homogenizado a magnitud momento, Mw.
3. Propuesta de un nuevo modelo de zonas sismogénicas para el cálculo de la peligrosidad sísmica que considere los regímenes tectónicos existentes: corteza, subducción interfase y subducción in-slab.
4. Estimación de los Parámetros de Sismicidad en cada zona sismogénica, que caractericen los patrones de sismicidad.
5. Selección de las ecuaciones de predicción del movimiento fuerte a utilizar que sean compatibles con el ambiente geofísico de la región de estudio.
6. Estructuración de un sistema de información geográfica de proyecto.
7. Cálculo de la peligrosidad sísmica y generación de mapas del movimiento esperado para diferentes parámetros espectrales y periodos de retorno en Ecuador continental y obtención de resultados específicos en cuatro ciudades: Quito, Esmeraldas, Guayaquil y Loja.

### **1.3.2.2 En relación al cálculo del riesgo sísmico.**

En este campo se diferencian los siguientes objetivos:

1. Identificación del escenario dominante de la peligrosidad sísmica en Quito.
2. Caracterización de la acción sísmica para el escenario anterior (Curvas de demanda).
3. Identificación de las tipologías constructivas predominantes en edificaciones de uso residencial en la parroquia Mariscal Sucre (Quito)
4. Asignación de las clases de vulnerabilidad a las tipologías identificadas y de sus correspondientes curvas de capacidad.
5. Estimación de la demanda de desplazamiento inelástico requerida por la acción sísmica en cada una de las tipologías constructivas identificadas.
6. Estimación del daño esperado ante la acción sísmica definida en cada clase de vulnerabilidad, para los diferentes barrios pertenecientes a la parroquia de estudio.
7. Configuración de un sistema de información geográfica con toda la información generada, de utilidad en estudios futuros.

## **1.4 ALCANCE DEL ESTUDIO.**

Como resultado del estudio, será presentado un nuevo mapa de peligrosidad sísmica en términos de aceleración pico del movimiento del suelo (PGA) para un período de retorno de 475 años, incluyendo los siguientes productos adicionales a los presentados en la NEC-11:

- Mapas de peligrosidad en términos de PGA para períodos de retorno de 975 y 2475 años.
- Mapas de peligrosidad en términos de aceleración espectral SA (T) para un período  $T= 1s$  y para períodos de retorno de 475, 975 y 2475 años.
- Curvas de peligrosidad, espectros peligrosidad Uniforme (UHS) y sismos de control obtenidos por desagregación de la peligrosidad para cuatro ciudades capitales de provincia. Estas han sido seleccionadas a partir de su ubicación dentro las principales unidades físicas, geológicas y tectónicas del país, su densidad poblacional y su ubicación en los mapas de peligrosidad.

Estos resultados serán de utilidad en aplicaciones dirigidas a la definición de la acción sísmica para el diseño sísmo resistente de estructuras convencionales o de importancia especial, o como input para futuros estudios de riesgo sísmico de cara a elaboración de planes de emergencia, sectores seguros, etc.

Los resultados de la desagregación de la peligrosidad en Quito, constituirán el input para el cálculo del riesgo sísmico en la segunda parte del trabajo, que se dirige esencialmente a edificaciones de uso residencial ubicadas en la parroquia urbana Mariscal Sucre. Esta se

extiende desde el norte del centro histórico de Quito, hasta la avenida Francisco de Orellana. Contiene elementos característicos tanto de la edificación tradicional propia del centro histórico como de la edificación moderna más propios de la zona norte de la capital (D'Ercole y Metzger, 2004).

Como resultados de riesgo se obtendrán probabilidades de superación de diferentes estados de daño, según la tipología constructiva o clase de vulnerabilidad, número de edificaciones residenciales por estado de daño y número de edificaciones que resultarían inhabitables ante la acción sísmica esperada. Estos resultados serán de utilidad e importancia significativa para la ejecución de actividades relacionadas con la planificación urbana y la gestión del riesgo sísmico.

La metodología de cálculo planteada utiliza los desarrollos metodológicos y el conocimiento actual de los factores que conforman los inputs de cálculo, por lo que podrá ser empleada para estudios similares en otras parroquias de la ciudad.



## **Capítulo 2**

# **MARCO METODOLÓGICO**



## 2.1 PELIGROSIDAD SÍSMICA.

### 2.1.1 FUNDAMENTO Y DEFINICIONES.

Desde una perspectiva amplia, la peligrosidad o amenaza sísmica se podría definir como el movimiento esperado en el futuro en un emplazamiento dado, a causa de los terremotos que ocurren en su entorno o zona de influencia.

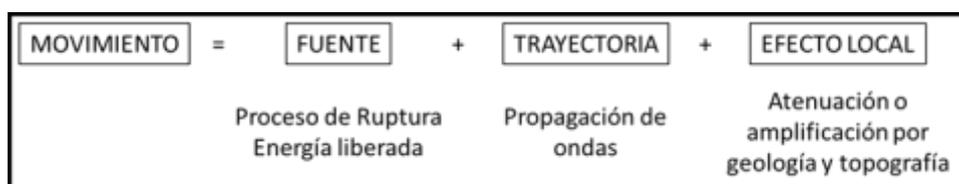
La estimación de la peligrosidad requiere caracterizar los factores que intervienen en el movimiento sísmico, que se pueden resumir en:

- Factor temporal, que indica la frecuencia con la que ocurren los terremotos en cada fuente sísmica.
- Factor de tamaño, que se relaciona con la energía que se puede liberar en cada fuente.
- Factor de distancia fuente-emplazamiento, que representa la probabilidad de que un terremoto se produzca en un rango de distancias dado, asumida su ocurrencia en una fuente sísmica.
- Factor de trayectoria fuente-emplazamiento, que representa la atenuación del movimiento sísmico en dicho recorrido.
- Factor de sitio, que depende de las características topográficas, litológicas y estructurales del emplazamiento de estudio.

Los dos primeros factores están estrechamente ligados a través del modelo de recurrencia de la sismicidad de cada fuente, que representa la distribución de terremotos en función de su magnitud y se incluye en el cálculo de la peligrosidad mediante una función de densidad de probabilidad en magnitudes  $f(m)$ . A este respecto el modelo más comúnmente empleado es el conocido como ley de Gutenberg-Richter.

Los factores de distancia y magnitud intervienen en el modelo de atenuación, también conocido como modelo de predicción del movimiento fuerte (GMPE, del inglés Ground Motion Prediction Equation). Este se expresa matemáticamente por una ecuación que permite predecir la variable del movimiento, usualmente aceleración máxima (PGA, del inglés Peak Ground Acceleration) o aceleraciones espectrales SA(T), en función de la magnitud y la distancia.

Las fases en la estimación de la peligrosidad sísmica, por lo tanto, pueden expresarse de forma simplificada como suma de tres factores determinantes (Figura 2.1): la fuente sísmica, la atenuación de la onda sísmica (o propagación del movimiento fuerte) y el efecto local o de sitio.



*Figura 2.1: Factores que intervienen en la evaluación de la peligrosidad sísmica.*

En la mayor parte de las aplicaciones, la peligrosidad sísmica se calcula primero en unas condiciones de suelo genéricas, tipo roca, sin incluir el factor de sitio y posteriormente se añade este factor mediante coeficientes de amplificación, dependiendo del tipo de terreno en el emplazamiento a estudiar.

En el caso de no considerar el efecto local del suelo, se asume que el movimiento se encuentra caracterizado en roca o suelo duro, que es el procedimiento generalmente aceptado para estudios de peligrosidad a nivel regional. Sin embargo, para estudios en emplazamientos específicos, será necesario estimar la amplificación local para obtener intensidades de movimiento que incluyan este efecto.

### 2.1.2 MÉTODOS DE CÁLCULO.

Los métodos de estimación de la peligrosidad sísmica se pueden clasificar en dos grandes grupos: deterministas y probabilistas.

Los métodos deterministas consideran valores específicos de los factores antes mencionados, es decir, un único terremoto de un tamaño dado, situado en una determinada fuente a una distancia definida del emplazamiento a estudiar. Estos métodos estiman el movimiento correspondiente a un cierto escenario sísmico y generalmente se adopta el más desfavorable siguiendo un criterio conservador, es decir, aquel que genera el mayor movimiento posible en el emplazamiento de estudio. La ventaja de estos métodos es que proporcionan el movimiento de un escenario conocido, es decir de un terremoto de cierta magnitud a cierta distancia y esto tiene ciertas ventajas de cara al diseño sismorresistente de estructuras. La principal desventaja es que no estiman la probabilidad de que se produzca dicho movimiento, es decir, éste puede generarse una vez cada 100 años, cada 1000 años, etc., algo que tiene implicaciones negativas en regulaciones de diseño.

Los métodos probabilistas representan los factores antes citados mediante funciones de probabilidad. La peligrosidad total en un emplazamiento se formula como la probabilidad de excedencia de un cierto nivel de movimiento, a causa de los terremotos que se producen en fuentes contenidas en la zona de influencia, teniendo en cuenta a su vez la probabilidad de ocurrencia de dichos terremotos en cada fuente, durante un periodo de exposición determinado. La peligrosidad total, es la suma de las contribuciones al movimiento debido a la sismicidad de las distintas fuentes y por tanto no se asocia a un terremoto concreto. En esta concepción probabilista se pierde la idea de escenario sísmico. A pesar de ello, la mayor parte de las normativas se basan en mapas de peligrosidad probabilistas, que representan la aceleración esperada en el territorio de interés para un cierto nivel de probabilidad de excedencia y periodo de tiempo. Por ejemplo, para viviendas convencionales es habitual considerar el movimiento con un 10 % de probabilidad de excedencia en 50 años.

En su concepción probabilista, la peligrosidad sísmica (H, del inglés Hazard) se define como la probabilidad (P) de que se iguale o supere un nivel de movimiento predeterminado ( $x_0$ ) dentro de un periodo de tiempo dado o periodo de exposición (t), a consecuencia de los terremotos ocurridos en el entorno del emplazamiento de cálculo:

$$H = P [x (s) \geq x_0; t] \quad (2.1)$$

Siendo  $x (s)$ , el parámetro que representa el movimiento, que habitualmente se identifica con la aceleración pico del mismo (PGA) o con alguna aceleración espectral (SA (T)).

Este cálculo probabilista de la peligrosidad, considera que la probabilidad de excedencia del movimiento es función de, al menos, tres variables: distancia  $r$ , magnitud  $m$  y épsilon  $\epsilon$ , que se toman como variables independientes. El parámetro  $\epsilon$  está relacionado con la variabilidad del modelo de predicción del movimiento fuerte y representa el número de desviaciones típicas que se consideran en la predicción sobre el valor medio que proporciona el modelo (Benito y Jiménez, 1999).

La peligrosidad se estima como el producto de la probabilidad de excedencia del movimiento, condicionada a los valores que toman las variables  $r$ ,  $m$  y  $\epsilon$  por las probabilidades individuales de cada variable (o funciones de densidad de probabilidad,  $f_{x_i}(x_i)$ ). Precisamente los términos  $f_{R_i}(r_i)$  y  $f_{M_i}(m_i)$ , que dan cuenta respectivamente de la probabilidad de que un sismo ocurra a una distancia  $r_i$  y con determinada magnitud  $m_i$ , son particulares de cada zona sismogénica. La suma (o integral) de estas probabilidades condicionadas para todas las zonas fuente, extendidas a todos sus rangos de variación, proporciona la estimación de la probabilidad de excedencia del movimiento en el emplazamiento  $P(x(s) \geq x_0)$  y el producto de ésta por la tasa anual de ocurrencia de sismos en las respectivas zonas,  $v_i$ , proporciona la tasa anual de excedencia del movimiento o peligrosidad sísmica expresada en términos anuales (Kramer, 1996):

$$\begin{aligned} \lambda(a > A) &= \sum_{i \text{ zonas}} v_i P_i[a > A] = \sum_{i \text{ zonas}} v_i P_i[a > A | m, r, \epsilon] f_{M_i}(m) f_{R_i}(r) f_{\epsilon_i}(\epsilon) = \\ &= \sum_{i \text{ zonas}} v_i \int_{M_o}^{M_m} \int_{R \text{ min}}^{R \text{ max}} \int_{\epsilon \text{ min}}^{\epsilon \text{ max}} P_i[a > A | m, r, \epsilon] f_{M_i}(m) f_{R_i}(r) f_{\epsilon_i}(\epsilon) dm dr d\epsilon \end{aligned} \quad (2.2)$$

El término  $f_{R_i}(r)$ , la densidad de probabilidad en distancias de la fuente considerada, se debe calcular numéricamente y varía para cada fuente. El término  $f_{M_i}(m)$ , la densidad de probabilidad en magnitudes, depende del modelo de recurrencia adoptado para modelizar la sismicidad de la fuente. Finalmente, el término  $f_{\epsilon_i}(\epsilon)$  expresa la probabilidad de que la excedencia del movimiento del terreno se produzca cuando se utiliza la media más un determinado número ( $\epsilon$ ) de desviaciones estándar del modelo de movimiento empleado. La función de probabilidad en este caso es una distribución normal estándar normalizada, cuyos valores vienen tabulados. Un valor de  $\epsilon=0$  supone calcular el valor medio del parámetro de movimiento en cuestión.

Considerando que la sismicidad es distribuida aleatoriamente en tiempo y espacio dentro de una determinada zona, se puede asumir un modelo de Poisson para su representación, y en consecuencia se puede identificar la amenaza como la probabilidad de excedencia del movimiento en un periodo de exposición de  $t$  años mediante la siguiente expresión:

$$P(x > x_0 \text{ en } t \text{ años}) = 1 - e^{-\lambda(x > x_0) t} = 1 - e^{-t/T} \quad (2.3)$$

Siendo  $\lambda$  la tasa anual media de excedencia del nivel de movimiento y  $T$  el período de retorno, definido también como el valor inverso de la probabilidad anual de excedencia.

Las normativas sismorresistentes de manera general adoptan un tiempo de exposición ( $t$ ) de 50 años, variando la probabilidad de excedencia ( $P$ ) en función de la importancia de la estructura. Por ejemplo, se considera una probabilidad de excedencia del 10% en un período de exposición de 50 años, que equivale a considerar un período de retorno de 475 años para estructuras de importancia normal, como viviendas convencionales. Para estructuras de importancia especial, como hospitales o escuelas, se considera un período de retorno de 975 años en un período de exposición de 50 años, que corresponde a una probabilidad de

excedencia del 5%. De manera análoga, estructuras más críticas consideran un período de retorno de 2475 años, asumiendo una probabilidad de excedencia del 2% en 50 años.

Los primeros métodos probabilistas fueron propuestos durante los años sesenta (Esteva, 1968; Cornell, 1968) y permitieron estimar, por primera vez, probabilidades de excedencia para el parámetro de movimiento elegido, generalmente la aceleración pico, PGA.

La aplicación del método probabilista requiere asumir ciertas hipótesis y ciertos modelos para cuantificar la influencia de la fuente y de la propagación de ondas en la evaluación de la peligrosidad, dando como resultado la probabilidad de excedencia de ciertos valores de la amplitud del movimiento en el sitio (prefijado), como consecuencia de los terremotos que puedan ocurrir en cualquier punto del área de influencia.

El proceso global de cálculo conlleva numerosas incertidumbres, que hacen que los resultados se puedan ver afectados de un alto grado de dispersión. La subjetividad en la definición de fuentes sísmicas, o de modelos de movimiento del terreno, son por ejemplo, dos de los factores más determinantes en la incertidumbre final de los resultados.

Ante el desconocimiento de los modelos reales de fuente y propagación, en las dos últimas décadas se ha impulsado la línea PSHA (del inglés, Probabilistic Seismic Hazard Assessment) que pone especial énfasis en la consideración de distintas hipótesis sobre la información básica y lleva a cabo un análisis de las incertidumbres asociadas (Bernreuter et al., 1989; Budnitz et al., 1997).

Existen esencialmente dos tipos de incertidumbres (Epistemológicas y Aleatorias) que se presentan en las diferentes fases de cálculo de la amenaza: definición de zonas sismogénicas y relaciones de recurrencia, leyes de atenuación (o modelos de predicción del movimiento) y efecto de las condiciones locales del emplazamiento. Para cuantificar y calibrar dichas incertidumbres se ha propuesto la metodología de árbol lógico, que permite considerar distintos nodos, correspondientes a distintos estados del proceso (p. e. zonificación, elección de modelo de atenuación, etc.) y ramas en cada nodo que corresponden a opciones del mismo.

Finalmente y como complemento a los estudios probabilistas, se recurre a la técnica de desagregación de la peligrosidad, cuyo propósito es definir las características (usualmente, distancia fuente-emplazamiento y magnitud) del sismo de control, o sismo que aporta mayor contribución a la peligrosidad en un emplazamiento dado.

El estudio de peligrosidad completo consta de varias tareas representadas en la Figura 2.2, cuya descripción se desarrolla más adelante:

- Análisis de la sismicidad y de la tectónica del área de estudio.
- Elaboración del catálogo de proyecto.
- Definición y caracterización de fuentes sísmicas.
- Elección del modelo del movimiento fuerte del terreno o de atenuación.
- Cálculo de la peligrosidad propiamente dicho, resolviendo la ecuación de probabilidad.
- Desagregación e identificación de los sismos de control.

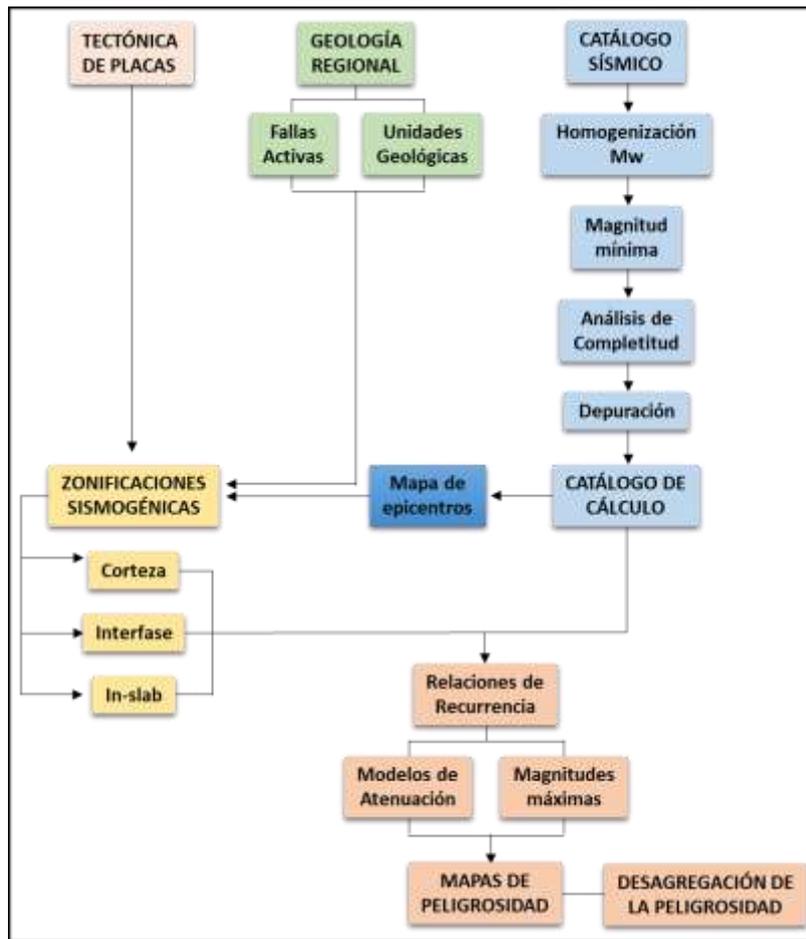


Figura 2.2: Esquema que representa el proceso de cálculo de la peligrosidad.

En cuanto al parámetro de cálculo, inicialmente era habitual considerar la intensidad macrosísmica (sentida en un punto), como parámetro representativo del movimiento, debido a la escasez de acelerogramas antes de los años 80. Después comenzó a generalizarse el cálculo de la peligrosidad en términos de la PGA y los valores resultantes se combinaban con formas espectrales, para deducir los espectros de respuesta a introducir en el diseño sismorresistente de estructuras.

Posteriormente, con el desarrollo de los modelos de predicción del movimiento fuerte del suelo, se hizo posible el cálculo de curvas de peligrosidad para todas las ordenadas espectrales de interés, lo que a su vez permitió la definición de espectros de peligrosidad uniforme UHS (del inglés Uniform Hazard Spectrum). Estos se construyen “punto a punto”, fijando una probabilidad común para todas las ordenadas espectrales SA (T) y teniendo en cuenta, además, que la PGA representa la SA(T) para periodo T=0.

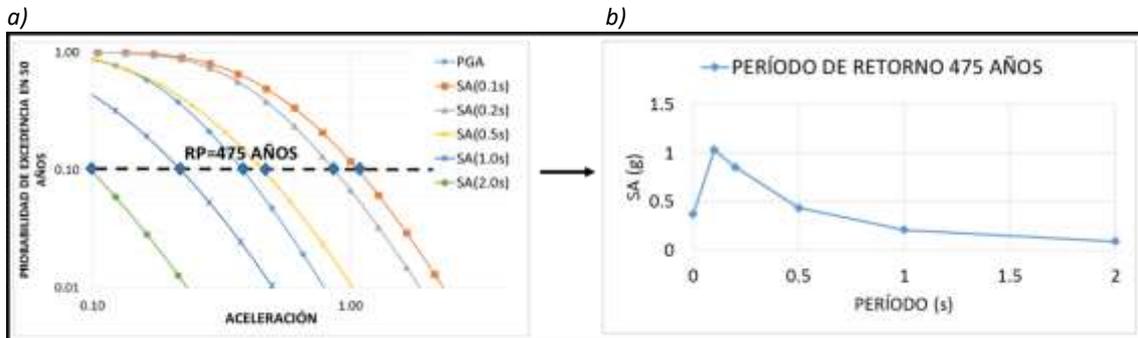
### 2.1.3 REPRESENTACIÓN DE RESULTADOS.

De esta manera, los resultados de peligrosidad en un cierto emplazamiento se pueden representar, esencialmente, de dos formas:

- Curvas de peligrosidad, que expresan la probabilidad de excedencia de distintos niveles de movimiento del parámetro elegido, que pueden obtenerse tanto para la PGA como para diferentes SA(T).

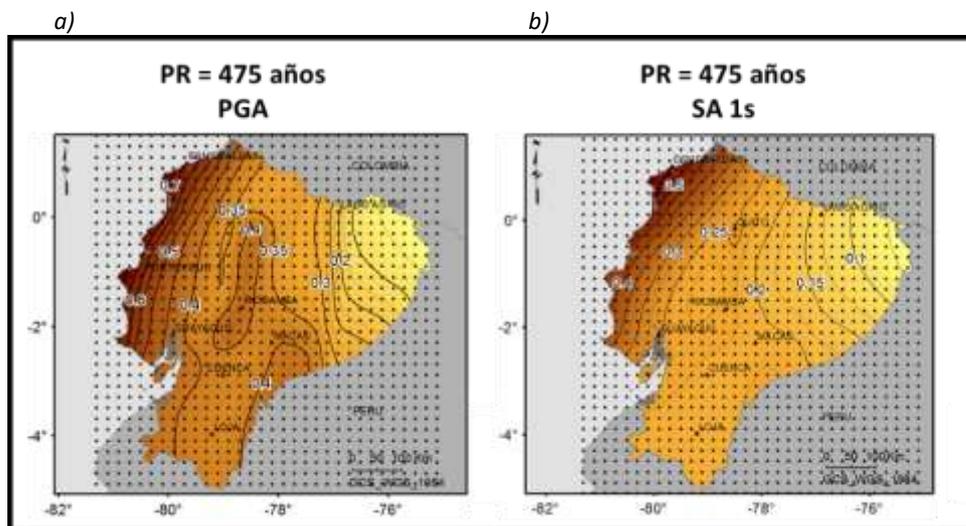
- Espectros UHS para los periodos de retorno que se fijan, elegidos generalmente en función de la importancia de la estructura. Para un cierto periodo de retorno, el correspondiente UHS se deriva cortando las curvas de peligrosidad de las diferentes ordenadas espectrales SA(T) a una misma probabilidad, y deduciendo así los valores que permiten construir el espectro “punto a punto”.

La Figura 2.3 muestra un ejemplo de ambos tipos de resultados.



**Figura 2.3:** Determinación del espectro UHS (b), a partir de la probabilidad anual de excedencia (a).

La representación de la amenaza sísmica a nivel regional, se efectúa normalmente por medio de mapas de isolíneas, que muestran la variabilidad del parámetro considerado para un período de retorno dado. Para ello, se realiza el cálculo en una malla de puntos equidistantes que cubren el área de estudio y se ejecuta una interpolación de los valores obtenidos en cada punto, Figura 2.4.



**Figura 2.4:** Representación de la peligrosidad por medio de mapas de isolíneas, a) en términos de aceleración pico PGA y b) SA 1s, considerando un período de retorno de 475 años.

Un análisis adicional se puede realizar con el objetivo de delimitar las características del sismo que más contribuye a la peligrosidad sísmica en el emplazamiento, dado un período de retorno y frecuencia espectral, proceso que se conoce como la desagregación de la amenaza y que tiene por finalidad identificar los escenarios que más contribuyen a la misma.

El proceso de desagregación consiste en una descomposición de la peligrosidad total en contribuciones parciales, identificando la combinación magnitud-distancia-épsilon, que más

contribuye a la excedencia del movimiento en un cierto emplazamiento. Dicha combinación o terna se identifica con el denominado sismo de control.

A modo de ejemplo, en la Figura 2.5, la desagregación se lleva a cabo descomponiendo la peligrosidad en contribuciones de intervalos de magnitud ( $\Delta m = 0.25$ ), intervalos de distancia ( $\Delta r = 30$  km) y valor de  $\epsilon$  ( $=2$ ). Como se puede observar, el sismo que más contribuye a la peligrosidad corresponde a uno de magnitud 7.0 ubicado en un rango de distancia de 60-90 km.

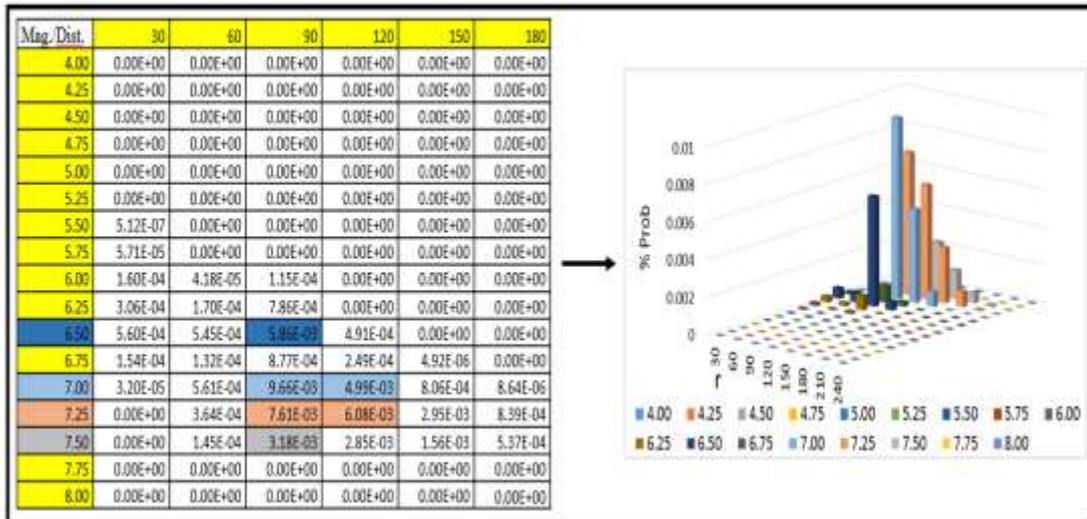


Figura 2.5: Delimitación del sismo de control.

## 2.1.4 FASES DE CÁLCULO.

### 2.1.4.1 Catálogo de proyecto.

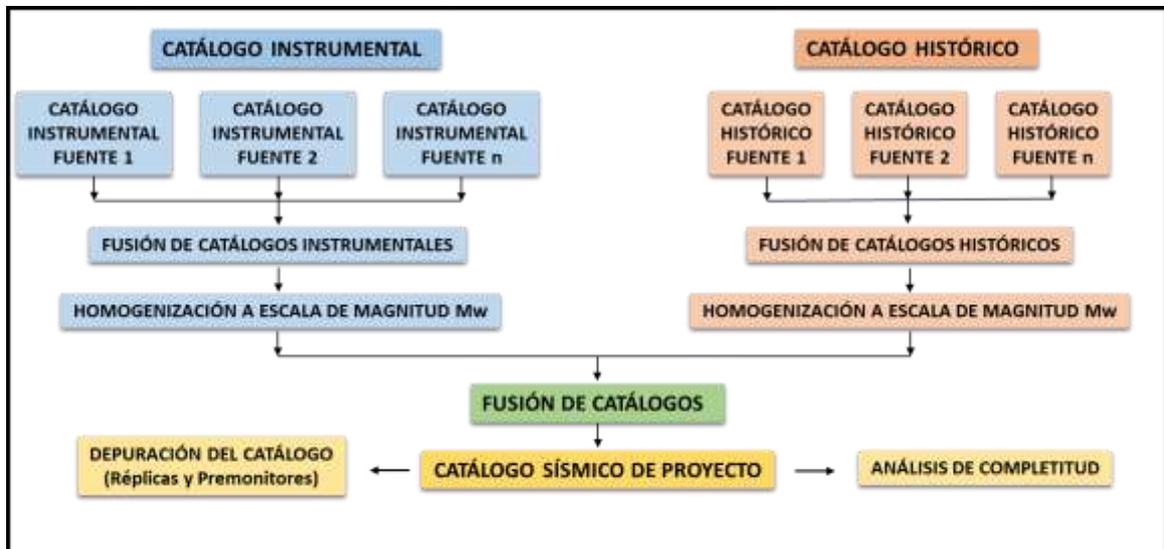
El conocimiento de la sismicidad en la región de estudio es el primer paso a seguir en un estudio de peligrosidad, ya que es necesario conocer la ocurrencia de terremotos en el pasado para establecer un patrón de sismicidad y extrapolarlo al futuro. Para ello se hace necesaria la recopilación de información de terremotos ocurridos en época preinstrumental o histórica y de eventos registrados instrumentalmente.

Los registros instrumentales incluyen información bastante completa de los terremotos ocurridos desde el siglo XX. Sin embargo, existe falta de homogeneidad en el establecimiento de su magnitud y localización epicentral, debido a la evolución de las redes sísmicas y a la intervención de diferentes agencias en el cálculo de los parámetros focales.

Los terremotos históricos o preinstrumentales son determinados a partir de información macrosísmica, especialmente derivada del estudio de la distribución de daños e intensidades. Su localización se determina generalmente en el centro del área de mayor daño, o isosista de mayor intensidad, por lo que su ubicación es bastante imprecisa y subjetiva.

La integración de la sismicidad previamente analizada, que incluya todos los terremotos que potencialmente pueden afectar al emplazamiento de estudio, permite configurar un Catálogo Sísmico de Proyecto (Figura 2.6). Sobre este deben realizarse procesos de:

- Homogenización del parámetro de tamaño a una escala común de magnitud.
- Corrección por falta de completitud, para la correcta estimación de la tasa de sismicidad.
- Cuando se adopta un método probabilista zonificado, debe depurarse también de réplicas y premonitores, para verificar la hipótesis asumida de independencia entre eventos.

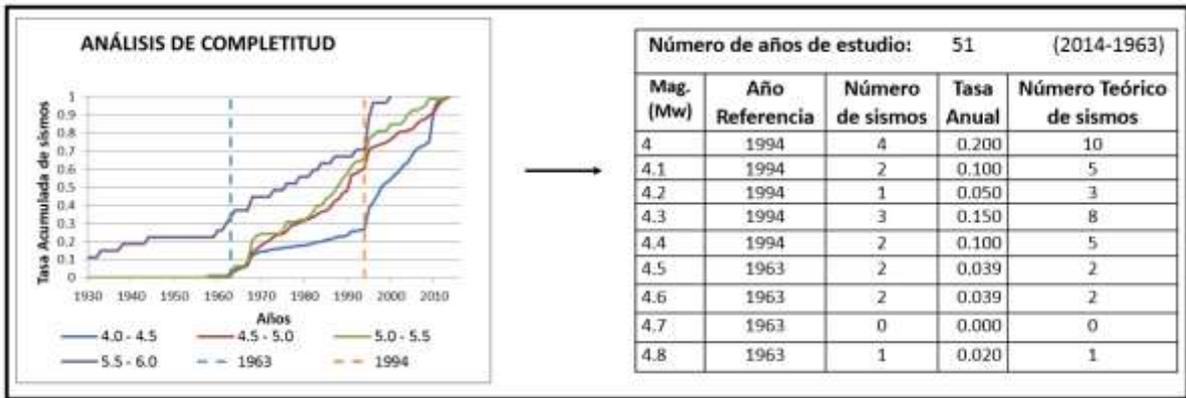


*Figura 2.6: Fases en la confección del Catálogo Sísmico de Proyecto.*

Un catálogo sísmico se considera completo en un determinado rango de magnitud, si contiene todos los sismos que presumiblemente hayan ocurrido en ese rango. El problema es que a medida que disminuye la magnitud se pierde información al remontarnos en el tiempo, por lo que, para magnitudes moderadas o bajas, el catálogo solo suele ser completo en las épocas más recientes. Para efectuar la corrección por falta de completitud se adopta en este trabajo la metodología planteada por Stepp (1973), que consiste en analizar la variación temporal de cada intervalo de magnitud y establecer un año de referencia a partir del cual puede considerarse que el registro de sismos de ese intervalo es completo.

La tasa de sismos para cada rango de magnitud, se calcula a partir del correspondiente año de referencia y se considera constante, extrapolándose a todo el período del estudio.

En la Figura 2.7, se representan las tasas acumuladas de sismos provenientes del catálogo de proyecto en diferentes rangos de magnitud, pudiendo observarse su evolución temporal. Para cada rango se identifican cambios de pendiente que reflejan cambios de tasa, situación que puede asociarse generalmente a mejoras en el nivel de detección de las redes y no a cambios reales en la sismicidad. Se identifica así para cada rango de magnitud, el año de referencia a partir del cual se considera el registro completo de sismos y se estima la tasa correspondiente a partir de dicho año.

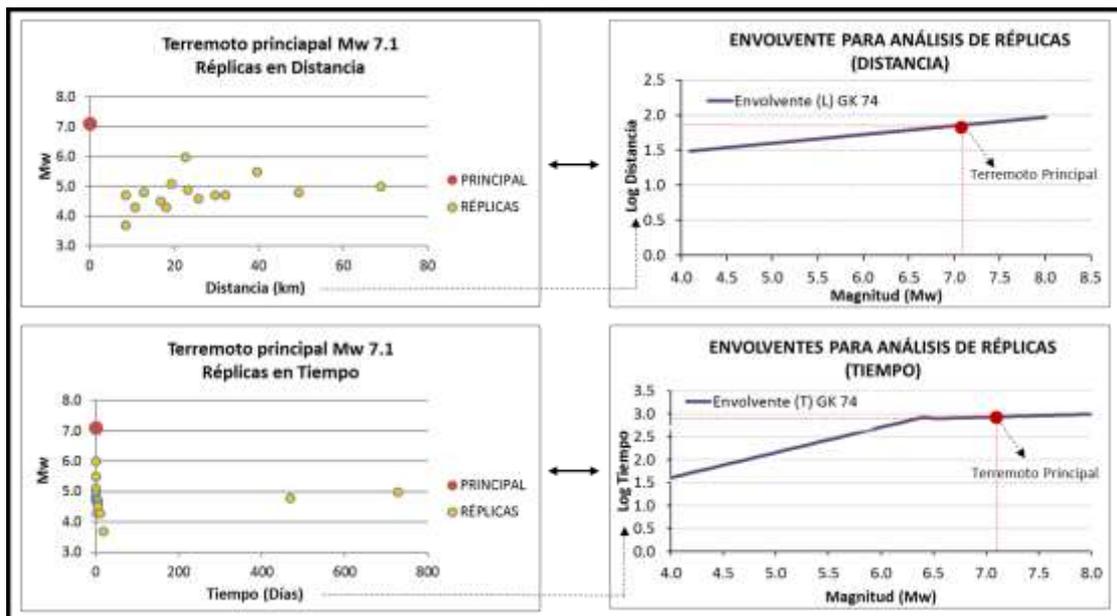


**Figura 2.7:** Análisis de completitud y determinación del número teórico de sismos para cada rango de magnitud.

El catálogo inicial de proyecto será uno de los inputs para delimitar las zonas sismogénicas o zonas capaces de generar terremotos de similares características, distribuidos de manera uniforme y ajustados a un modelo de Poisson, lo que implica asumir la independencia temporal y espacial entre los sismos pertenecientes a una misma fuente.

Para cumplir con esta premisa, se hace necesario identificar en el catálogo los premonitores y réplicas de un terremoto principal, para lo cual se han propuesto diferentes metodologías, siendo las más generalizadas la de Reasenberg (1985) y la de Gardner y Knopoff (1974). Esta última propone funciones logarítmicas, con el fin de acotar las ventanas espaciales y temporales que contienen a las réplicas y premonitores de un evento principal, permitiendo así identificar series sísmica. Estas son luego eliminadas en el proceso de depuración, dejando solamente el sismo principal.

En la Figura 2.8 se representan las réplicas para un terremoto de magnitud Mw 7.1, determinadas a partir de las relaciones logarítmicas en Tiempo y Distancia propuestas por Gardner y Knopoff (1974). En donde se verifica que todos los terremotos de magnitud Mw > 7.1, ubicados a una distancia menor a 73 km ( $\text{Log } 10 = 1.9$ ) y en un tiempo menor a 863 días ( $\text{Log } 863 = 2.9$ ) son considerados réplicas.



**Figura 2.8:** Envoltentes propuestas por Gardner y Knopoff (1974) para el análisis y depuración de réplicas.

#### 2.1.4.2 Zonificación sísmica y caracterización de la sismicidad.

En el cálculo probabilista de la peligrosidad sísmica, las fuentes sísmicas son modeladas como zonas sismogénicas o sismogénicas, asumiendo que cada una de ellas se identifica por una tasa de actividad sísmica constante en el tiempo, de forma que los terremotos son sucesos aleatorios independientes, con igual probabilidad de ocurrencia en toda la zona y cuya frecuencia y tamaño se relacionan por una ley logarítmica debidamente limitada a un valor máximo. La importancia de la demarcación de las zonas sismogénicas, se verá reflejada en la forma de las isólinas del parámetro de cálculo (p. e. PGA) para un determinado período de retorno.

La delimitación de cada zona, sin dejar de ser un proceso subjetivo, tiene un efecto significativo en la evaluación de la peligrosidad, ya que a partir de su delimitación se estimarán los máximos sismos potenciales asociados a cada una de ellas y las leyes de recurrencia que gobiernan su sismicidad. Estos datos caracterizan el término “fuente” en la estimación de peligrosidad.

El máximo sismo potencial, es el mayor que puede esperarse en la fuente y para determinarlo debe conocerse tanto la sismicidad ocurrida en el pasado, como la capacidad de las fallas geológicas existentes para generar sismos de una cierta magnitud.

Un problema que se presenta a menudo, es que el tiempo de registro histórico es más corto que el intervalo de recurrencia en ciertas fallas, y el máximo sismo observado no tiene por qué coincidir con el máximo posible. Este problema se puede solventar, al menos en parte, si se dispone de información obtenida por estudios de paleosismicidad de las principales estructuras activas.

Cuando dicha información no está disponible, deben adoptarse otras soluciones, como mayorar el máximo histórico, estimar magnitudes máximas a partir de la longitud de las fallas, observar la tendencia hacia las magnitudes altas en el modelo de recurrencia, etc. Este es uno de los datos más complicados de estimar para cada fuente sísmica, al que se dedica buena atención en este trabajo de tesis.

No obstante, en los métodos probabilistas no se consideran únicamente las magnitudes máximas en representación de cada zona. La sismicidad de la misma se compone tanto de sismos grandes como pequeños, siendo éstos últimos más frecuentes que los anteriores, por lo que debe especificarse la frecuencia de ocurrencia de sismos en función de su magnitud, por medio de un modelo de recurrencia.

El potencial sísmico es entonces descrito mediante el uso de modelos matemáticos o leyes de recurrencia que utilizan parámetros como: tasa de sismos de determinada magnitud ( $\dot{n}$ ) o tasa acumulada de sismos de una magnitud mayor o igual a una magnitud dada ( $\dot{N}$ ) y la proporción de sismos grandes frente a pequeños definida como  $\beta$  o  $b$ , dependiendo del tipo de logaritmo que se utilice.

Gutenberg y Richter (1944) mostraron que en una determinada zona y en un determinado intervalo de tiempo, existe una proporción constante entre el número de sismos grandes frente al número de sismos pequeños, asumiendo que la relación entre  $\log N$  y  $m$  debía ser lineal; donde  $m$  representa la magnitud y  $N$  representa el número acumulado de sismos con magnitud  $\geq m$ ; definiendo así la ley de Gutenberg Richter con la siguiente relación:

$$\log N(m) = a - b * m \quad (2.4)$$

donde,

b: es la pendiente de la relación, que representa la proporción entre el número de sismos grandes y el número de sismos pequeños en cada zona.

a: es la ordenada al origen, a partir de la cual se puede estimar la tasa anual de terremotos que supera una magnitud de referencia.

Los valores de a y b se estiman mediante análisis de regresión, ajustando los datos de sismicidad de la zona a la expresión indicada.

La relación puede expresarse también en términos de logaritmo neperiano, como:

$$\ln N(m) = \alpha - \beta m \quad (2.5)$$

donde,

$$\alpha = a * \ln 10 \quad (2.6)$$

$$\beta = b * \ln 10 \quad (2.7)$$

En el análisis PSHA, se asume que la recurrencia de terremotos obtenida para el pasado es extrapolable para la predicción de la sismicidad en el futuro, por lo que es importante disponer de observaciones que cubran un amplio intervalo de tiempo, con la finalidad de considerar la información relacionada a los sismos de tamaño grande que son menos frecuentes.

El modelo de Gutenberg y Richter (1944) suele aplicarse con un doble truncamiento en magnitud propuesto por Cosentino et al. (1977), limitándolo a un rango entre una magnitud mínima y una magnitud máxima ( $M_{\min}$ ,  $M_{\max}$ ), siendo la tasa el número de sismos de magnitud igual o superior a la mínima establecida ( $\dot{N}(M_{\min})$ ) (Figura 2.9).

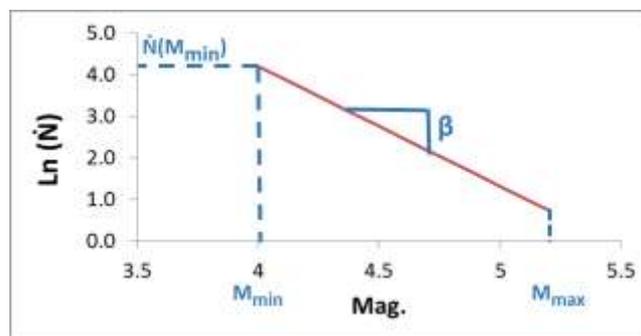


Figura 2.9: Recta de Gutenberg y Richter con doble truncamiento.

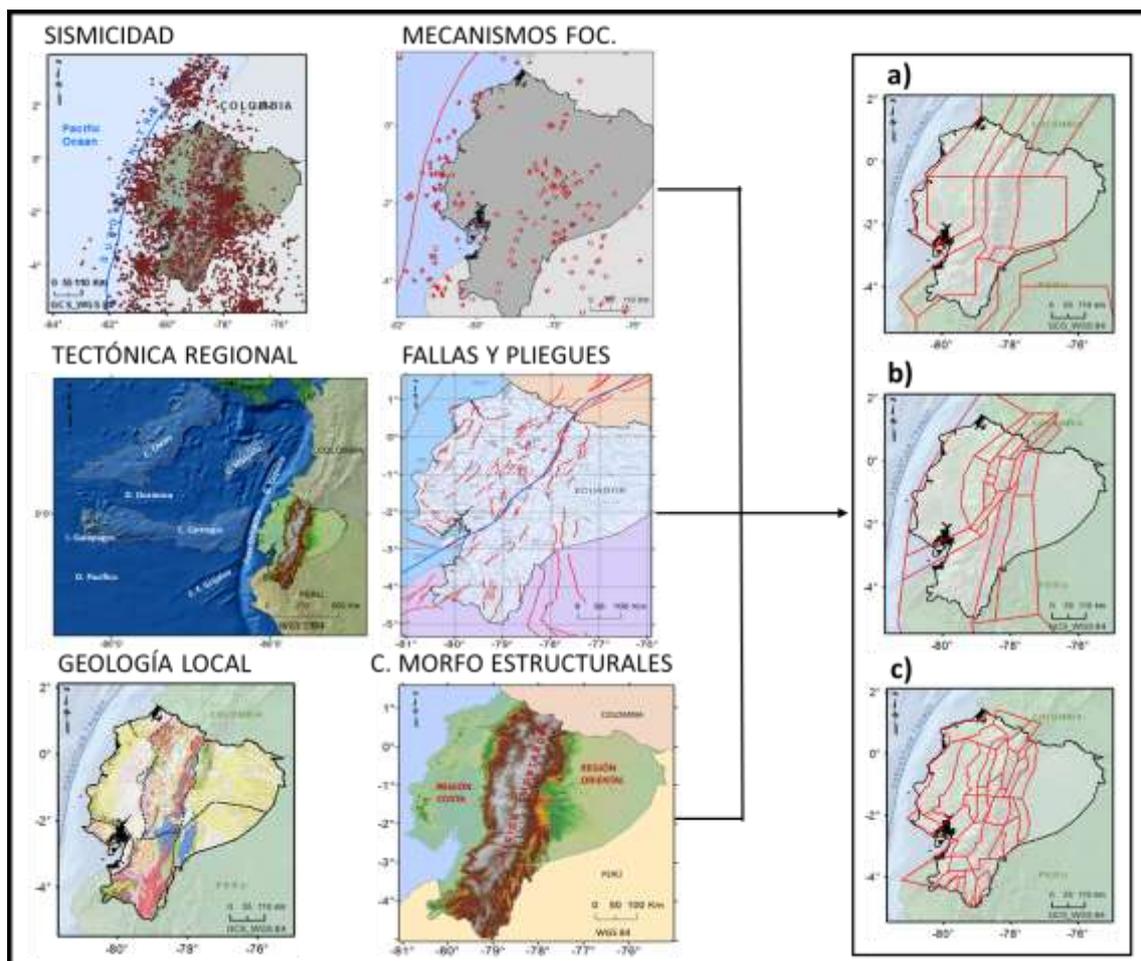
Finalmente, los parámetros que definen la sismicidad de cada zona son:

- Magnitud máxima ( $M_{\max}$ ) correspondiente al máximo sismo potencial.
- Magnitud mínima ( $M_{\min}$ ) a partir de la cual se evalúa la excedencia de un cierto nivel de movimiento.
- Tasa de sismos de magnitud superior a la magnitud mínima ( $\dot{N}(M_{\min})$ ).
- Pendiente de la relación: b o  $\beta$ , dependiendo de si ésta se plantea en términos de logaritmo decimal o neperiano, respectivamente.

En resumen, el proceso de modelización de las fuentes como áreas o zonas sismogénicas, implica dividir la región de influencia en polígonos independientes entre sí, que presentan en el interior de cada uno de ellos un potencial sísmico uniforme. Ello supone que todos los puntos en el interior de una fuente llevan asociados un mismo modelo de recurrencia y los mismos parámetros de sismicidad descritos anteriormente.

Siendo la sismicidad un elemento clave en la delimitación de las áreas sismogénicas, no es el único factor a considerar, ya que es necesario apoyarse en otros elementos de análisis tales como: el conocimiento de las estructuras geológicas identificadas en la corteza de la superficie terrestre, la distribución geográfica y evolución de las características tectónicas tanto en planta como en profundidad o la presencia de características físicas dominantes en la región de influencia. Un esquema con los distintos tipos de datos a considerar en la definición de fuentes sísmicas es mostrado en la Figura 2.10.

Es deseable que el análisis de los aspectos enunciados, entre otros, converjan hacia una misma solución, permitiendo así la compartimentación de la región de estudio y dando como resultado una zonificación sismogénica confiable. Sin embargo, es habitual encontrar diferentes propuestas siguiendo diferentes criterios, por lo que el proceso de zonificación conlleva un grado de subjetividad importante.

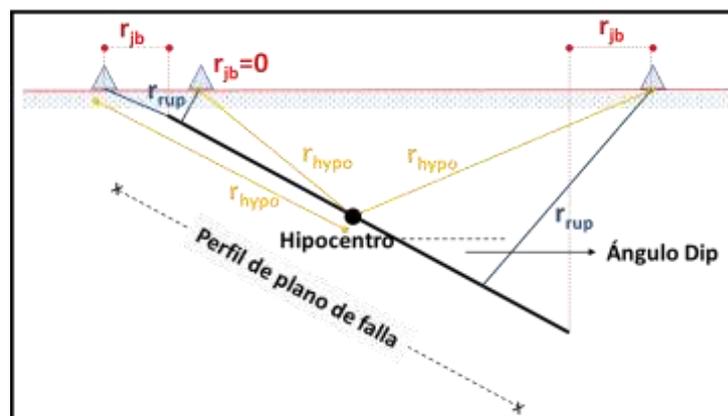


**Figura 2.10:** Esquema que representa la información geofísica y tectónica que se considera para la delimitación de zonas sismogénicas de corteza. En la parte derecha se presentan propuestas realizadas por: a) Aguiar (2013, comunicación personal); b) Alvarado (2012); c) Chunga (2010).

### 2.1.4.3 Atenuación de ondas sísmicas.

El efecto de la propagación de las ondas sísmicas a través del medio, desde la fuente hasta el emplazamiento, se incluye en el cálculo de la peligrosidad mediante modelos de atenuación del movimiento del suelo, también llamados ecuaciones de predicción del movimiento.

La amplitud de las ondas se atenúa como consecuencia de la expansión geográfica del frente de ondas y de la anelasticidad del medio. Para abordar este efecto se necesitaría un conocimiento detallado de la estructura que separa la fuente del emplazamiento, algo que normalmente no se tiene. Por ello, habitualmente el efecto se aborda mediante el uso de modelos empíricos que relacionan el parámetro representativo del movimiento en un punto (generalmente la aceleración pico o espectral) con los parámetros que establecen el tamaño del sismo en la fuente (generalmente la magnitud), la distancia fuente-emplazamiento (en alguna de sus variantes) y la desviación típica de los datos respecto al modelo ( $\sigma$ ), entre otros. La Figura 2.11 muestra diferentes tipos de distancia que se manejan habitualmente en las ecuaciones de atenuación.



**Figura 2.11:** Distancia Fuente-Emplazamiento.

*Notación:*

$r_{hypo}$ : distancia desde el sitio al hipocentro del terremoto.

$r_{jb}$ : Distancia desde el sitio a la proyección vertical en superficie del plano de ruptura.

$r_{rup}$ : distancia mínima desde el sitio al plano de ruptura.

En la literatura especializada se han propuesto modelos de atenuación del movimiento o ecuaciones de predicción del movimiento del suelo GMPE, que se plantean ajustando las observaciones disponibles, como valores registrados de PGA o SA (T), a expresiones matemáticas cuyos coeficientes se determinan por análisis de regresión. Estos modelos suelen ser clasificados de acuerdo al régimen tectónico al que pertenece la zona, distinguiéndose entre modelos de corteza, de subducción superficial o profunda y de zonas volcánicas, esencialmente.

De acuerdo a la cantidad y diversidad geográfica de la procedencia de los registros acelerométricos empleados para desarrollar el modelo, se pueden distinguir entre modelos locales, regionales y globales, siendo éstos últimos de aplicación generalizada.

El uso de un modelo viene también condicionado por rangos de magnitud y de distancia fuente emplazamiento, delimitados a partir de la base de datos considerada para su formulación, por lo que no se recomienda la extrapolación fuera de los rangos recomendados.

Además de las variables de magnitud, distancia y  $\epsilon$ , los modelos actuales incluyen también variables dependientes del tipo de suelo, mecanismo focal y otros parámetros, que acotan la incertidumbre de cálculo del movimiento para escenarios definidos.

En regiones donde no se dispone de los datos necesarios para plantear o realizar una calibración de los modelos de atenuación, es necesario realizar un análisis que permita identificar las ecuaciones que han sido planteadas para regiones con similares características sismotectónicas.

#### 2.1.4.4. Efecto Local.

Finalmente, para cuantificar el efecto local debido al tipo de suelo en el emplazamiento, se utiliza esencialmente la información procedente de estudios de geología superficial, que permitan determinar la composición del suelo, la velocidad de las ondas de corte, etc.

En la Figura 2.12 se representan el espectro de peligrosidad resultante de la aplicación del modelo de atenuación, considerando el tipo de suelo presente en el sitio de interés y la geometría de la fuente.

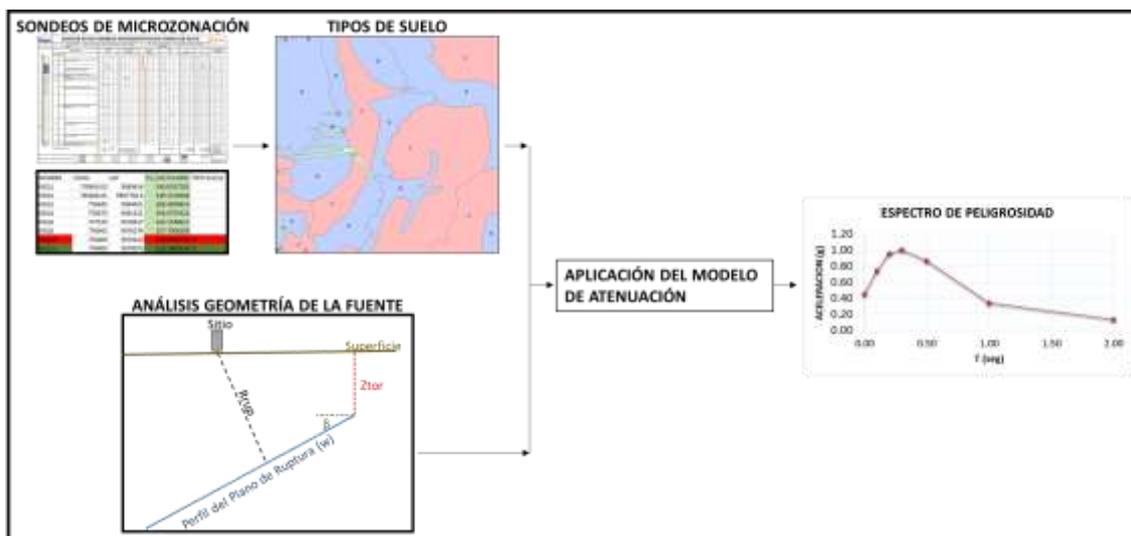


Figura 2.12: Esquema que representa la estimación del efecto local.

#### 2.1.5 CUANTIFICACIÓN DE INCERTIDUMBRES.

Por lo expuesto, la utilización de modelos de atenuación conlleva una incertidumbre que se encuentra también presente en las diferentes fases de cálculo, como la delimitación de las zonas sismogénicas, sus relaciones de recurrencia o las características físicas locales del emplazamiento, que finalmente influyen en los resultados de la peligrosidad.

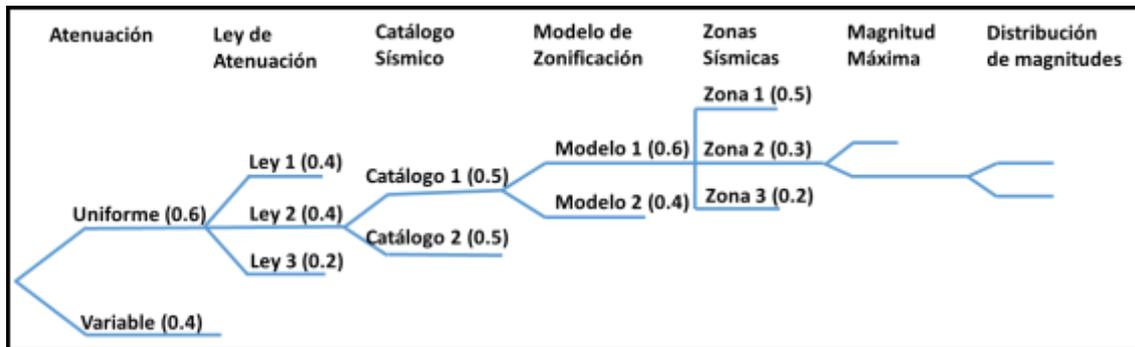
Existen básicamente dos tipos de incertidumbres:

- Epistémicas: vinculadas a la diferencia existente entre el modelo teórico propuesto y el modelo funcional real. Por ejemplo, en el cálculo probabilista de la peligrosidad sísmica, la falta de conocimiento de la geometría y actividad sísmica de las fuentes, o del modelo de propagación de ondas, se considera tomando en cuenta diferentes zonificaciones sismogénicas o relaciones de atenuación, mediante el uso del árbol lógico, en donde varias opciones pueden ser consideradas en el cálculo.

- Aleatorias: debidas a la aparente aleatoriedad de los datos respecto a un cierto modelo. En análisis PSHA se consideran tomando en cuenta la desviación estándar de la relación que describe los modelos. Por ejemplo, la aleatoriedad en la propagación de las ondas sísmicas es considerada mediante la desviación estándar de la relación de atenuación usada. También pueden considerarse las desviaciones inherentes a otros parámetros, como la magnitud máxima (Mmax), el parámetro b, etc.

Un método para dar cuenta de las incertidumbres en estudios de peligrosidad, siguiendo el tipo de análisis conocido como PSHA, es el denominado árbol lógico, en el que se integra el juicio de expertos para llegar a un consenso sobre la verosimilitud de las opciones alternativas.

El árbol lógico está compuesto por una serie de nodos y ramas (Figura 2.13). Cada nodo representa la estimación de una opción de cálculo o un estado del proceso que debe ser ejecutado en el estudio, cuya incertidumbre se desea cuantificar. Cada rama que parte de un nodo representa una posible alternativa y lleva asignada un peso o valor de probabilidad que indica el grado de credibilidad de que la rama represente el modelo correcto. Se asume que entre todas las ramas que conducen a un nodo se encuentra el modelo real, por lo que la suma de todos los pesos debe ser la unidad (Benito et al., 2012).



**Figura 2.13:** Esquema general de un árbol lógico para la estimación de la amenaza sísmica. En paréntesis se identifican los pesos asignados a cada rama (modificada de: Benito et al., 2010).

## 2.2 RIESGO SÍSMICO.

### 2.2.1 DEFINICIÓN Y FUNDAMENTOS.

El riesgo sísmico se define como la función de probabilidad de pérdidas derivadas de los daños a un elemento o conjunto de elementos (p. e. una ciudad) como consecuencia de la acción de terremotos (López y Villacañas, 1999). Es por tanto, función de las características de esta acción y de la respuesta a ella de los elementos en riesgo.

Según la definición de la United Nations Disaster Relief Organization (UNDRO, 1979) oficialmente aceptada, el Riesgo Sísmico (R) en una determinada población se define como:

$$R = H * V * E * C \quad (2.8)$$

donde,

H: Peligrosidad sísmica que determina el movimiento esperado en la población.

V: Vulnerabilidad de las estructuras.

E: Exposición o densidad de estructuras y habitantes.

C: Coste de reparación o de pérdidas.

Siguiendo estrictamente la definición anterior, el riesgo vendría expresado en términos económicos, que representarían el coste de reparación por pérdidas ante el movimiento reflejado por medio de la peligrosidad.

Numerosas variantes han sido propuestas, a fin de expresar el riesgo en otros términos, por ejemplo porcentaje de un determinado grado de daño en una cierta tipología estructural, daño medio, número de víctimas mortales y heridos, número de viviendas inhabitables, etc.

La elección del índice de riesgo depende de la aplicación a la que vaya dirigido el estudio, pero en cualquier caso su estimación requiere conocer el parque inmobiliario en la zona, es decir el número de estructuras de cada tipología o clase de vulnerabilidad, así como la relación entre el movimiento de entrada y los daños esperados en cada tipología. Dicha relación se introduce mediante las llamadas curvas de fragilidad o matrices de probabilidad de daño, que son una expresión del porcentaje de cada grado de daño en cada clase de vulnerabilidad, para diferentes niveles de movimiento del suelo.

La estimación del riesgo supone entonces combinar resultados del análisis de peligrosidad, con asignaciones de vulnerabilidad sobre el stock de edificaciones y la elección de curvas de fragilidad, para concluir con la estimación de daños en cada tipología. Este será el planteamiento general del estudio a realizar, tras el cual se realizará también una estimación del daño sobre el total de edificaciones en el sector de estudio.

### **2.2.2 METODOLOGÍAS.**

Dentro de las iniciativas desarrolladas tendientes a proponer metodologías para el análisis del riesgo sísmico cabe mencionar (FEMA 356, 2000):

- Proyecto ATC-13, desarrollado en 1985 para la evaluación del daño ocasionado por terremotos en California.
- Reporte Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, publicado por el Applied Technology Council (ATC-40, 1996).
- Reporte Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, publicado por la American Society of Civil Engineers, que propone una herramienta aplicable para llevar a cabo la rehabilitación sísmica de edificaciones, incluyendo además contenidos relacionados a procedimientos de análisis (FEMA 356, 2000).

Posteriormente, se publica el programa HAZUS MH MR4, desarrollado por el National Institute of Building Science en colaboración con el Federal Emergency Management Agency (HAZUS, 2003), en el que se plantea una metodología estandarizada que contiene modelos para estimar potenciales pérdidas debido a la ocurrencia de amenazas naturales en Estados Unidos.

En el año 2005 se publica el reporte FEMA 440, en el que se proponen mejoras a los procedimientos utilizados en FEMA 356 y ATC 40 (FEMA 440, 2005).

Además, por su importancia en Europa, cabe mencionar el proyecto RISK-UE, que proporciona un enfoque de escenarios de riesgos ocasionados por terremotos con aplicaciones a diferentes ciudades europeas (Mouroux y Bun, 2006), o el trabajo de Lagomarsino y Giovinazzi (2006), en el que se proponen modelos macrosísmicos y mecánicos para el cálculo de la vulnerabilidad y daños de edificaciones, para ser usados cuando la peligrosidad viene dada en términos de intensidad macrosísmica o en términos de aceleración pico y valores espectrales (Lagomarsino y Giovinazzi, 2006).

### **2.2.3 FASES DE CÁLCULO (PLANTEAMIENTO GENERAL).**

Todo estudio de riesgo debe comenzar definiendo el escenario de peligrosidad, al que se someterán los elementos expuestos para calcular después el daño esperado en los mismos.

Dicho escenario puede ser probabilista o determinista. En este trabajo se propone un escenario híbrido, resultante de desagregar la peligrosidad obtenida con carácter probabilista. Este se caracteriza inicialmente por un espectro de respuesta en roca, al que se aplicará la amplificación local debida al tipo de suelo en cada punto de estudio. Este espectro constituye la curva de demanda que se utilizará para la posterior estimación del daño.

Seguidamente debe construirse una base de datos donde se recoja toda la información necesaria para la asignación de vulnerabilidad y cálculo de riesgo. Teniendo en cuenta la escala a la que se realizará el trabajo, dicha base de datos debe contener el censo de viviendas en cada geounidad definida.

A continuación, se debe efectuar un análisis que permita la identificación de las tipologías constructivas y la asignación de clase de vulnerabilidad con sus correspondientes curvas de capacidad para el conjunto de edificaciones de cada geounidad. De esta forma se añaden campos a la base de datos anteriormente descrita, que contienen el número de viviendas por tipología constructiva en cada geounidad.

En la siguiente fase se iniciará ya el cálculo de riesgo. Para ello se aplicará el método de coeficiente de desplazamiento mejorado, que se explica más adelante, para estimar el desplazamiento global máximo ante la acción sísmica esperada, representada por una curva de demanda para cada tipología constructiva, cuyo comportamiento está representado a su vez por una curva de capacidad.

Una de las cuestiones claves para el cálculo del riesgo, es la elección de curvas de fragilidad o matrices de probabilidad de daño, que son asignadas a cada tipología identificada. En el presente estudio se han utilizado las curvas propuestas en HAZUS (2003).

Finalmente, se calcularán parámetros representativos del daño, primero para cada tipología constructiva y finalmente para el total de edificaciones en cada geounidad.

Se generarán una serie de tablas incluyendo los resultados de los diferentes parámetros de riesgo estimados. Para facilitar la interpretación de resultados, se elaborarán diferentes mapas representando índices de riesgo, pudiendo complementarse en futuros estudios con estimaciones de pérdidas humanas y coste de reparación por daños materiales.

La Figura 2.14 muestra el esquema general del proceso desglosando las fases que se irán abordando secuencialmente, que se describen con mayor detalle a continuación.

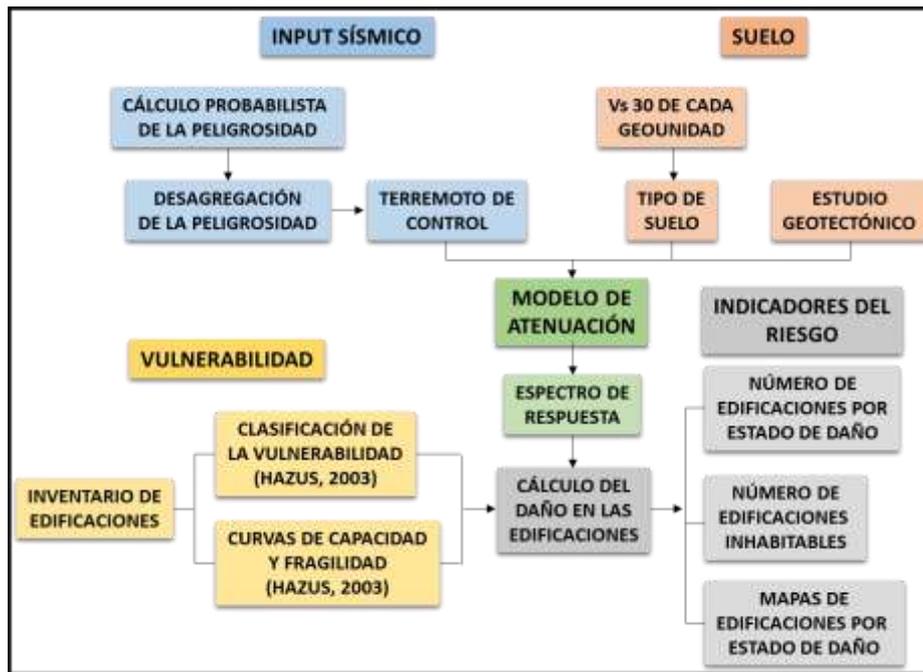


Figura 2.14: Esquema de las fases de cálculo del riesgo.

### 2.2.3.1 Caracterización del escenario de peligrosidad sísmica.

En estudios de riesgo a escala urbana, la acción sísmica se debe asociar a un escenario sísmico concreto y no solo a una estimación probabilista, en la que la contribución a la peligrosidad de varias fuentes impide identificar de forma directa el terremoto específico que causa el riesgo que se pretende conocer.

Para identificar ese escenario con una probabilidad asociada, se acude a la desagregación de la peligrosidad, que trata de identificar los eventos que más contribuyen a los movimientos objeto, dados por una cierta ordenada espectral para un periodo de retorno fijado. Estos eventos están asociados a las ternas magnitud-distancia-épsilon ( $M, R, \epsilon$ ) que presentan mayor densidad de probabilidad y por tanto mayor contribución a la excedencia del movimiento en cuestión. Los eventos definidos por esas ternas se denominan sismos de control.

Tras la identificación de los sismos de control, se buscan estructuras sismogénicas capaces de generarlos, compatibles con los pares (magnitud  $M$  y distancia  $R$ ) que presentan mayor contribución.

La acción o demanda sísmica asociada, que actuará como input en los elementos expuestos, será determinada mediante el uso de un modelo de movimiento fuerte, que dé cuenta de la atenuación de las ondas sísmicas y de condiciones locales del suelo.

El resultado final será un espectro elástico de respuesta con un amortiguamiento crítico, generalmente del 5%, que constituye la curva de demanda (Figura 2.15).

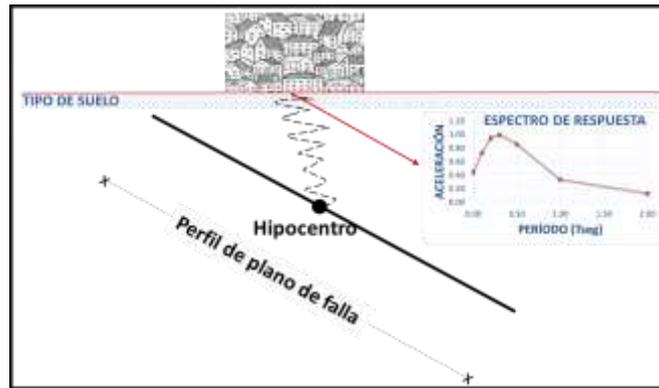


Figura 2.15: Esquema general del escenario sísmico.

### 2.2.3.2 Estudio de la vulnerabilidad.

La vulnerabilidad se define como la capacidad de daño de un elemento o elementos expuestos a una amenaza, en este caso expresada como el movimiento del suelo debida a la ocurrencia de un determinado evento sísmico.

La asignación de clases de vulnerabilidad sobre los elementos expuestos a la amenaza sísmica es esencial para estimar las pérdidas debidas a los movimientos esperados sobre un conjunto de edificaciones que conforma un núcleo urbano.

La vulnerabilidad de las edificaciones viene dada por la estimación de la respuesta de la estructura ante una determinada acción sísmica, que se expresa finalmente por la severidad del daño en el tipo de edificación modelo.

Para la asignación y caracterización de la vulnerabilidad en estudios de riesgo, se requieren esencialmente las siguientes acciones: 1) clasificación de tipologías constructivas, 2) asignación de una función de capacidad a cada clase, que representa la respuesta de dicha clase y 3) elección de una función de fragilidad, que representa la relación entre el movimiento de entrada, la tipología constructiva y la probabilidad de alcanzar o superar un estado de daño.

Hay dos métodos principales para la asignación de la vulnerabilidad sísmica y posterior estimación del daño:

- Métodos empíricos, que se basan en estadísticas de daños en edificaciones debidos a terremotos pasados.
- Métodos analíticos, que se basan en funciones matemáticas que predicen el comportamiento del edificio en función de su diseño, sus materiales, edad de construcción, etc., y que se han obtenido a través de un cálculo que considera modelos teóricos de la estructura (p. e. análisis pushover) y observación experimental (FEMA 440, 2005).

El uso de uno u otro método dependerá de la información básica disponible, si bien en estudios a nivel municipal es más recomendable el uso de métodos analíticos que permiten predecir el grado de daño de la estructura con mayor precisión, cuando los valores de amenaza están dados en términos de PGA y aceleraciones espectrales.

En cualquier caso, la asignación de vulnerabilidad requiere las siguientes tareas:

- Recopilación de datos (bibliografía, bases de datos de edificaciones, bases de datos de población, etc.) para los entornos urbanos del área de estudio. En este sentido, la base de datos debe contener información lo más detallada posible relativa a las diferentes estructuras (materiales, número de plantas, uso, ocupantes, etc.) y sus características geométricas (p. e. edad, tipo de sistema resistente de cargas horizontales y verticales, tipo de cimientos y cubierta, etc.).
- A diferencia de los estudios de vulnerabilidad a escala regional, donde el análisis se realiza sobre una base estadística inmobiliaria, un estudio municipal requiere determinar con mayor precisión las características generales de la edificación, incorporando las idiosincrasias particulares de cada emplazamiento, además de una valoración de edificios singulares específicos, particularmente aquellos que cumplen una función específica.

Se requiere así desarrollar un inventario general de edificaciones, que suelen diferenciarse de acuerdo a las siguientes características:

- Su uso: residencial, comercial, industrial, agrícola, entre otros, o instalaciones esenciales, que son aquellas que proveen servicios a la comunidad y deberían funcionar después de ocurrida una catástrofe, incluyen: hospitales, estaciones de policía, instalaciones de bomberos, centros de atención a emergencias, entre otras, las cuales reciben un tratamiento diferente para estimar las probabilidades de estado de daño.
- Composición constructiva de las estructuras: cuyo objetivo es el de agrupar a las edificaciones con similares características.

De esta manera, los modelos de predicción de daño pueden ser desarrollados para tipos de edificaciones que representan las características promedio del total de la población en cada clase.

De manera general, para realizar la diferenciación de clases o tipologías se consideran los siguientes elementos básicos:

- Parámetros estructurales: sistema estructural básico, altura de la edificación y criterios de diseño sísmico aplicados en base al cumplimiento de códigos de construcción, que se suelen diferenciar como: altos, moderados, bajos o no diseñados sísmicamente (pre-códigos).
- Prácticas constructivas regionales.

#### **2.2.3.2.1 Curvas de capacidad.**

Las curvas de capacidad de las tipologías constructivas son derivadas a través de un análisis pushover, mediante el cual se somete un modelo estructural a uno o más patrones de cargas laterales hasta generar una relación fuerza-deformación inelástica no lineal. Se generan así curvas de capacidad que representan la resistencia a la deformación de los componentes de la estructura, lo que determina su comportamiento más allá de su límite elástico.

Cada clase o tipología constructiva tiene su correspondiente curva de capacidad (Figura 2.16), en donde se puede verificar:

- El punto de fluencia, que constituye el límite de la deformación elástica de la estructura y el inicio de su deformación plástica, considerando la resistencia de sus materiales.
- El punto de capacidad última, que representa la máxima resistencia de la edificación cuando el sistema estructural global ha alcanzado un completo estado plástico.

Se asume que las edificaciones son capaces de deformarse más allá de su punto de capacidad última sin pérdida de estabilidad, pero su sistema estructural no provee resistencia adicional a la fuerza lateral del terremoto (HAZUS, 2003).

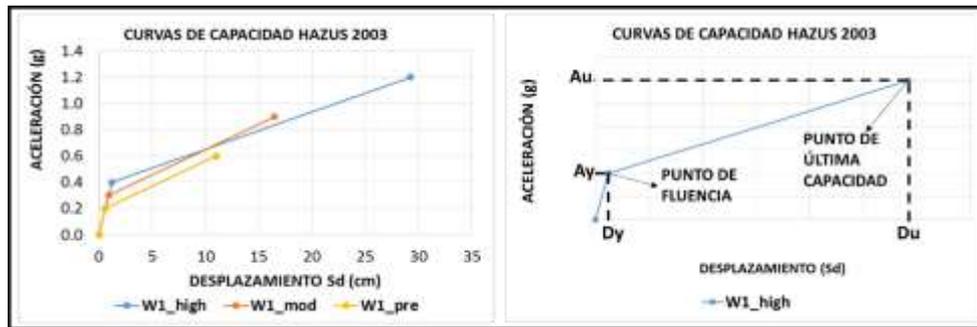


Figura 2.16: Ejemplos de curvas de capacidad tomadas de HAZUS (2003).

### 2.2.3.2.2 Curvas de fragilidad.

Las curvas de fragilidad describen la probabilidad de alcanzar o exceder diferentes estados de daño, dado un desplazamiento espectral pico de la edificación ante un nivel del movimiento del suelo (Figura 2.17). Esta probabilidad se encuentra modelada como una distribución lognormal acumulativa de la siguiente manera:



Figura 2.17: Ejemplo de curvas de fragilidad, en donde se representan los estados de daño para diferentes desplazamientos espectrales.

Cada curva de fragilidad está definida por un valor medio del desplazamiento espectral, que a su vez corresponde al límite del estado de daño y por la variabilidad asociada al estado de daño. La probabilidad condicional de exceder un estado de daño particular ( $d_s$ ), dado un desplazamiento espectral ( $S_d$ ), está definida por (HAZUS, 2003):

$$P [d_s | S_d] = \Phi \left[ \frac{1}{\beta_{d_s}} * \ln \left( \frac{S_d}{S_{d, d_s}} \right) \right] \quad (2.9)$$

donde,

$P [d_s | S_d]$ : es la probabilidad de que la estructura alcance o exceda el estado de daño  $d_s$ , debido al desplazamiento espectral  $S_d$ .

$\Phi$ : es la función de distribución normal estándar acumulativa.

$\beta_{ds}$ : es la desviación estándar del logaritmo natural del desplazamiento espectral para el estado de daño  $ds$ .

$S_d$ : desplazamiento espectral.

$S_{d, ds}$ : es el valor medio del desplazamiento espectral, al cual la edificación alcanza el límite de estado de daño  $ds$ .

Los valores del desplazamiento espectral medio y de la variabilidad total, son desarrollados para cada una de las tipologías constructivas y estado de daño estructural.

### 2.2.3.3 Cálculo de demandas de desplazamiento.

Al interactuar el espectro de respuesta elástico con la representación del comportamiento de la edificación, se obtiene una estimación del nivel de desempeño de la estructura, para lo cual se hace necesario la aplicación de procedimientos que permitan predecir éste desempeño.

De entre las opciones de análisis sísmicos inelásticos, se encuentran los procedimientos analíticos estáticos no lineales, en donde se incluyen las siguientes técnicas de análisis que parten de la determinación de una curva pushover para predecir el comportamiento inelástico de la estructura:

- Técnicas de linealización equivalente: se asume que el desplazamiento máximo total demandado, elástico más inelástico, de un oscilador de un grado de libertad, puede ser estimado por la respuesta elástica de un oscilador con un período y amortiguamiento más grandes que el original.

Este procedimiento utiliza estimaciones de ductilidad para estimar el período efectivo y el amortiguamiento.

Una de éstas técnicas es el Método Capacidad-Demanda utilizado en ATC 40 (1996), que se inicia con la generación de un espectro de capacidad que es graficado sobre los mismos ejes que la demanda sísmica, representada por el espectro de respuesta.

A continuación, se estima el período equivalente ( $T_{eq}$ ), que es el período para el cual la demanda del movimiento sísmico del suelo reducida por el amortiguamiento equivalente, interseca la curva de capacidad. A este punto de intersección se le denomina punto de desempeño (Figura 2.18).

Dado que el período equivalente y el amortiguamiento están ambos en función del desplazamiento, la solución para estimar el desplazamiento inelástico máximo es iterativa (FEMA 440, 2005).

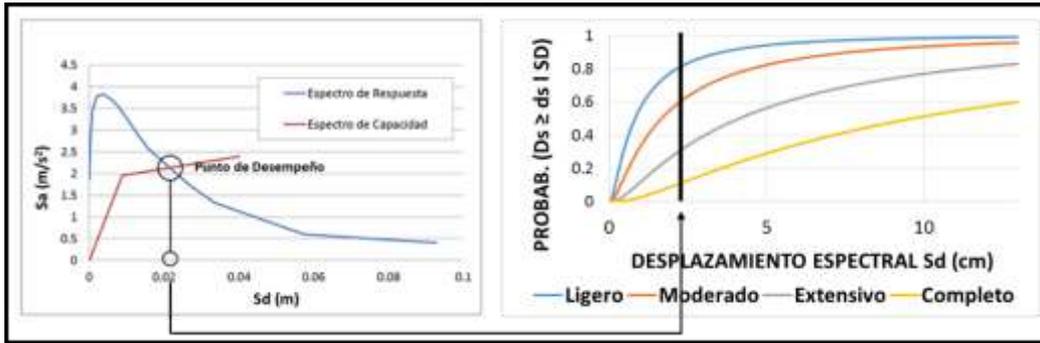


Figura 2.18: Representación del Método Capacidad-Espectro.

- Técnicas de modificación del desplazamiento: aquí se ubica el Método de Coeficiente de Desplazamiento, documentado en FEMA 356 (2000), que modifica la predicción elástica de la demanda de desplazamiento o la respuesta elástica lineal del sistema equivalente de un grado de libertad, al multiplicarlo por coeficientes derivados empíricamente, para obtener el desplazamiento máximo global, que es el desplazamiento objeto y corresponde al desplazamiento a nivel del techo.

El proceso se inicia con la identificación del período efectivo ( $T_e$ ) en la curva de capacidad, que representa la pérdida de rigidez en la transición de un comportamiento elástico a inelástico, o la rigidez lineal del sistema equivalente de un grado de libertad.

El período efectivo se grafica sobre el espectro de respuesta elástico, cuyas ordenadas se encuentran en términos de aceleración espectral ( $S_a$ ) y las abscisas en términos del período ( $T$ ). De esta manera se identifica la respuesta de aceleración máxima para el oscilador.

El desplazamiento espectral pico es directamente relacionado con la aceleración espectral mediante la relación (FEMA 440, 2005):

$$S_d = (T_e^2 / 4\pi^2) * S_a \quad (2.10)$$

Finalmente, la demanda de desplazamiento global máximo se estima modificando el desplazamiento espectral pico al multiplicarlo por coeficientes derivados empíricamente (Figura 2.19).

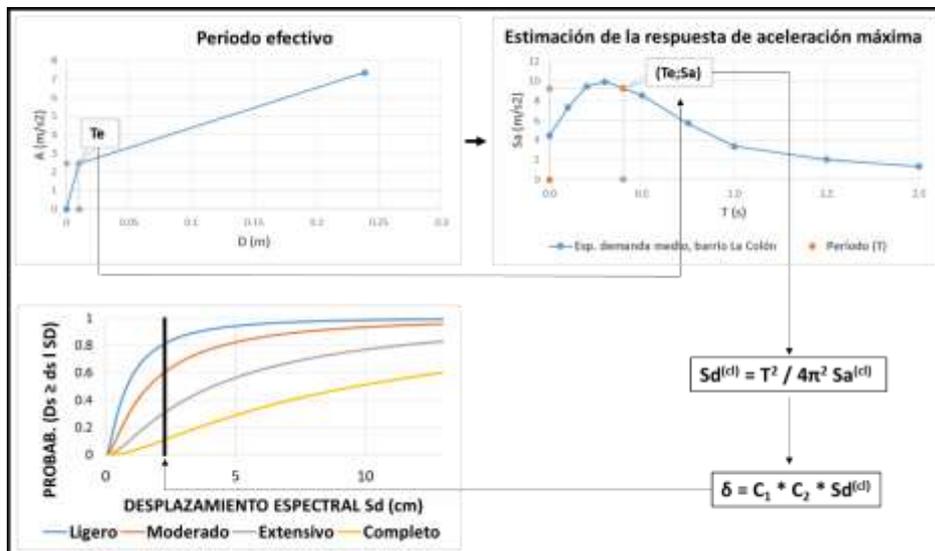


Figura 2.19: Esquema de desarrollo del Método Coeficiente de Desplazamiento.

Dado que en algunos casos no se obtenían resultados similares al utilizar estas dos técnicas, el ATC y el FEMA ejecutaron el Proyecto ATC-55 y publicaron el reporte FEMA 440 (FEMA 440, 2005), en el que se realiza una evaluación y se proponen mejoras a los procedimientos utilizados en FEMA 356 y ATC 40.

Las mejoras realizadas al Método Coeficiente de Desplazamiento, se relacionan al uso de los coeficientes para modificar la predicción elástica de la demanda de desplazamiento objeto que se estima con la siguiente relación (FEMA 440, 2005):

$$\delta_1 = C_1 C_2 (S_d)^{c_1} \quad (2.11)$$

donde,

$C_1$ : es el factor para relacionar el desplazamiento máximo esperado de un oscilador no lineal con propiedades histéricas elásticas perfectamente plásticas, con la demanda de desplazamiento máximo del oscilador lineal.

$C_2$ : es el factor de modificación para representar el comportamiento histérico y su degradación de rigidez en la respuesta del desplazamiento máximo.

Los coeficientes  $C_1$  y  $C_2$ , responden a las siguientes expresiones (FEMA 440, 2005):

$$C_1 = 1 + (R-1) / (a Te^2) \quad (2.12)$$

$$C_2 = 1 + 1 / 800 (R - 1 / Te)^2 \quad (2.13)$$

donde,

R: es la tasa de demanda de resistencia elástica con respecto a la capacidad de resistencia calculada (Quirós, 2011):

$$R = S_a^{(c_1)} / A_y \quad (2.14)$$

a: es la constante de la ecuación, y corresponde a los valores de 130, 90 y 60 para los tipos de suelo B, C y D respectivamente, propuestos en la clasificación NEHRP (2003).

Te: corresponde al período efectivo.

Ay: valor de la aceleración en el punto de fluencia.

Sa: pseudo aceleración determinada por el período efectivo (Te) en el espectro de respuesta.

#### **2.2.4 ESTIMACIÓN DEL GRADO DE DAÑO.**

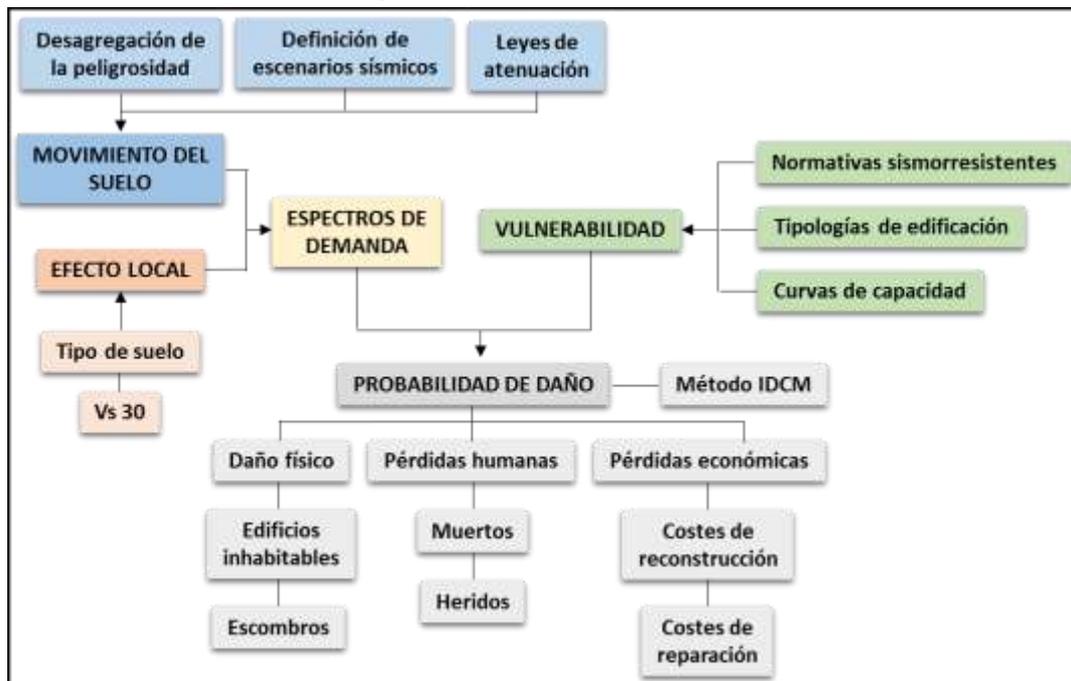
Tras la caracterización del escenario de peligrosidad sísmica, la asignación de tipologías constructivas para el parque inmobiliario, la identificación de curvas de capacidad y el cálculo de las demandas de desplazamiento, se estiman los daños estructurales y no estructurales de las edificaciones, utilizando las curvas de fragilidad correspondientes a cada tipología, en una clasificación que diferencia los grados de: ninguno, leve, moderado, extenso y completo. Las curvas de fragilidad y los grados de daño tienen una correspondencia con los definidos en HAZUS (2003).

Para la representación y gestión de los resultados de las fases anteriores, se almacena la información en un sistema de información geográfica, que contendrá datos georreferenciados de, al menos:

- Fichas catastrales de las edificaciones, con su respectiva ubicación y características estructurales.
- La peligrosidad o movimiento esperado (incluyendo el efecto local), representado por los valores que constituyen los espectros de respuesta (curvas de demanda) en las geounidades definidas.
- El tipo de suelo, simbolizado por la velocidad de onda de cizalla en los primeros 30 m ( $V_s30$ ).
- La distribución de tipologías constructivas en cada geounidad.

La integración de la amenaza, exposición y resistencia a la deformación de cada una de las tipologías constructivas, permite estimar la respuesta de las estructuras en el rango inelástico. Esta respuesta interactúa con las curvas de fragilidad para obtener los estados de daño que la estructura puede alcanzar o superar.

Como resultado final del estudio de riesgo sísmico se pueden estimar los indicadores de daño, como número de estructuras por estado de daño, número de edificaciones inhabitables, costes de reconstrucción, entre otros (Figura 2.20).



**Figura 2.20:** Esquema que representa la estimación del grado de daño en edificaciones.



## **Capítulo 3**

# **MARCO TECTÓNICO Y GEOLÓGICO**



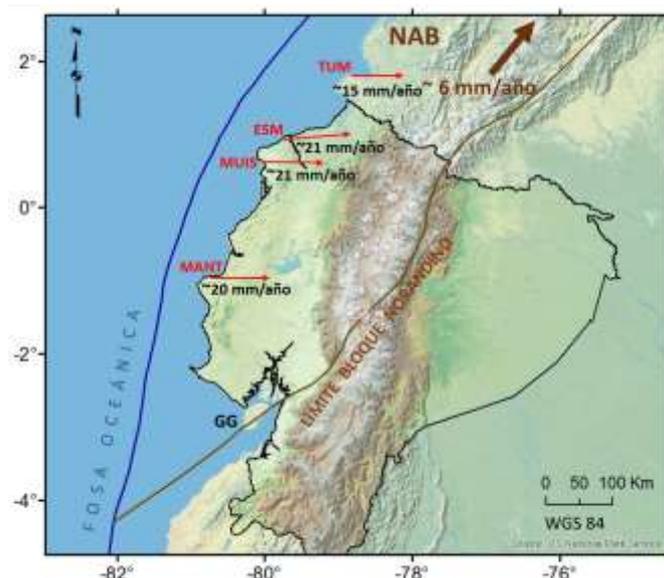
### 3.1 INTRODUCCIÓN.

En este capítulo se describen las características de las principales unidades tectónicas y geológicas que se encuentran en la zona de estudio, en base a las cuales se identifican las fuentes sísmicas existentes. Para ello se ha hecho una exhaustiva revisión del estado del arte, recopilando y analizando todos los trabajos publicados sobre tectónica y geología de Ecuador, así como de la zona de subducción en esta región geográfica. Se han identificado además las principales unidades existentes, que se describen en sucesivos apartados de este capítulo, sintetizando en cada uno los aspectos dominantes tectónicos y geológicos de cada unidad definida.

A nivel general, se puede afirmar que la dinámica de las características tectónicas presentes en la región, ha influido en la evolución de las estructuras geológicas identificables en Ecuador.

Se observa un límite de placas convergente que conforma la trinchera o fosa, a partir de la cual inicia la subducción de la placa de Nazca y de la cordillera de Carnegie. La llegada de ésta última a la fosa de subducción, podría haber contribuido a la formación de un arco volcánico activo en la corteza continental, ocasionando además el incremento de la tensión al inicio de la subducción (Egbue y Kellogg, 2010; Witt et al., 2006).

Se identifica la parcial transferencia de movimiento a la placa continental, con orientación Este, que se confirmaría con los vectores de velocidad en la línea de costa colombo-ecuatoriana, consistentes con la dirección de la subducción y magnitudes menores a la velocidad de movimiento de la placa oceánica (Figura 3.1). Además, el desplazamiento del Bloque Norandino (NAB), que podría ser la consecuencia del incremento en el acoplamiento interplaca ocasionado por la presencia de Carnegie (Nocket et al., 2014; Chunga et al., 2009; Trenkamp et al., 2002; Gutscher et al., 1999), que originaría la subsidencia del Golfo de Guayaquil (Witt et al., 2006).



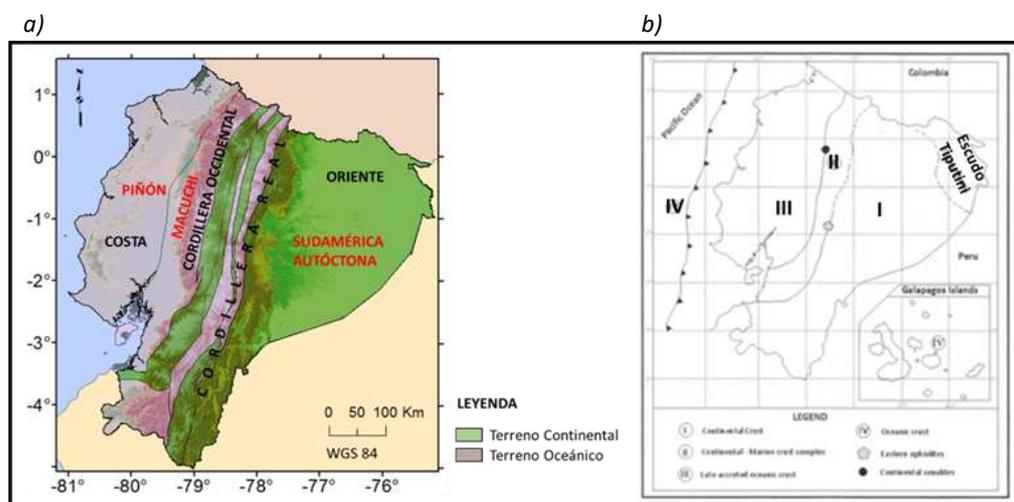
**Figura 3.1:** Vectores de velocidad en la línea de costa Colombo-ecuatoriana (Trenkamp et al. 2002).  
Notación: TUM: Tumaco; ESM: Esmeraldas; MUIS: Muisne; MANT: Manta; NAB: Bloque Norandino; GG: Golfo de Guayaquil.

Finalmente, la acreción de la placa continental con dirección Este, se corroboraría con la deformación transpresional de la placa superior, donde se identifican fallas activas a las que se les podría asociar la ocurrencia de terremotos superficiales con una profundidad menor o igual a 40 km (Chunga et al., 2009) y con el levantamiento de la cordillera costera y de los Andes ecuatorianos, que probablemente empezaría durante o antes del Mesozoico (Egüez et al., 2003).

### 3.2 PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS TECTÓNICAS.

A gran escala, Vera (2013) plantea que la evolución geológica que contribuyó a la formación de los Andes Ecuatorianos permite diferenciar 4 Territorios Tectónicos (Figura 3.2):

- I. Corteza Continental: localizada entre el Escudo Tiputini y el sistema de subducción Paleo-Cretácico en la Cordillera Real, compuesta por cinturones acrecionados Precámbricos-Paleozoicos.
- II. Complejo de corteza Continental-Marina: formado por cinturones continentales Triásicos, Jurásicos, Cretácicos y lozas oceánicas acretadas, que se ubican sobre rocas más antiguas.
- III. Corteza Oceánica Acretada Tardía: localizada en gran parte de la Cordillera Occidental, extendiéndose hasta la actual ubicación de la trinchera.
- IV. Corteza Oceánica: donde se localizan las Islas Galápagos.



**Figura 3.2:** Representación de los Territorios Tectónicos. a) Mapa provisional que muestra los Terrenos Tectono Estratigráficos (tomado de: Zamora y Litherland, 1993); b) Representación de los Territorios Tectónicos (modificada de Vera, 2013).

Dentro de estos grandes territorios tectónicos, se identifican, a menor escala, las unidades que se describen a continuación.

### 3.2.1 PLACA DE NAZCA.

Hace 25 millones de años (Ma), en la época del Oligoceno, la corteza oceánica Cretácica conocida como Placa Farallón se divide en dos placas tectónicas contiguas (Vera, 2013; Gutscher et al., 1999).

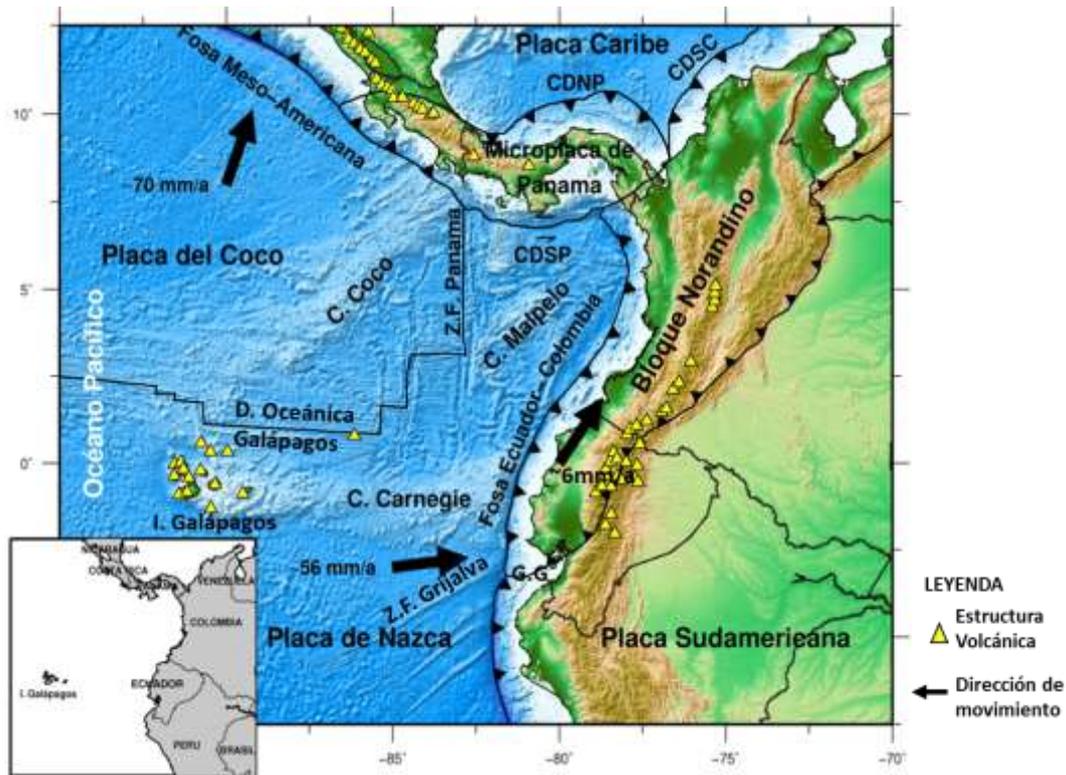
Posteriormente, hace aproximadamente 23 Ma, esfuerzos divergentes entre la Placa de Cocos direccionándose hacia el Noreste y la Placa de Nazca direccionándose hacia el Este, permiten identificar a la Dorsal Galápagos, que se ubicaría próxima al hotspot Galápagos, con una expansión N-S de 60 mm/año (Geología y Física Marina y Terrestre del Ecuador, 2009; Pazmiño y Michaud, 2009; Gutscher et al., 1999).

Los análisis de anomalías magnéticas sugieren una edad para Nazca de aproximadamente 20 a 12 Ma (Marcaillou et al., 2009) y una evolución de la orientación de la Dorsal Galápagos hasta alcanzar su actual dirección general E-O, desde hace aproximadamente 14.5 Ma (Sallarés et al., 2009).

De la interacción a partir del Mioceno entre la placa de Cocos dirigiéndose hacia el Noreste, la placa de Nazca dirigiéndose hacia el Este, el Punto Caliente Galápagos y la Dorsal Galápagos, resultarían las cordilleras de Carnegie, Cocos y Malpelo (Michaud et al., 2009; Gutscher et al., 1999).

Al Norte de Carnegie, Nazca estaría cortada por segmentos extintos del rift Malpelo que tienen una orientación N85°E y que en su parte oriental toman contacto con el graben Yaquina. Este último ha sido interpretado como una falla transformante con una orientación N25°E (Collot et al., 2009).

Al Sur de Carnegie, se localiza el Escarpe de Grijalva, que sería una antigua zona de fractura en la placa Farallón, con orientación N60°E y ligeramente cóncavo al Sur. Comienza a subducir frente al Golfo de Guayaquil y se constituye en el límite entre la corteza Neógena de Nazca, con una profundidad  $\leq 3000$  m al Norte, y la corteza oceánica más antigua del Oligoceno, con una profundidad  $\geq 3000$  m al Sur (Pazmiño y Michaud., 2009; Pedoja et al., 2009; Collot et al., 2009; Goyes, 2009; Gutscher et al., 1999) (Figura 3.3).



**Figura 3.3:** Características tectónicas de la región de estudio.

Notación: C., cordillera; D., dorsal; I., islas; G.G., Golfo de Guayaquil; Z. F., Zona de Fractura.

Para caracterizar la cinemática relativa de Nazca en relación a la estable de Sudamérica, se han realizado varios estudios que proponen velocidades y orientaciones respecto al movimiento de la placa oceánica. Entre ellos cabe citar el realizado por Nocquet et al. (2009), que basado en medidas geodésicas, indica que la placa de Nazca converge a lo largo del margen ecuatoriano a una velocidad de 55-58 mm/año en dirección N83°E, o el de Collot et al. (2009), donde se menciona que el movimiento relativo entre Nazca y Sudamérica es de aproximadamente 56 mm/año en una dirección N83°E, o el de Trenkamp et al. (2002), donde se indica que medidas GPS muestran una subducción activa rápida de la placa de Nazca frente a la costa ecuatoriana de  $58 \pm 2$  mm/año.

### 3.2.2 CORDILLERA SUBMARINA DE CARNEGIE.

Estudios hidrográficos, geológicos y geofísicos sugieren el origen común de las Islas Galápagos y de la Cordillera de Carnegie en el punto caliente de Galápagos. Se estima que el paso de la placa de Nazca sobre el hotspot dio inicio a la formación de Carnegie hace aproximadamente 20 a 23 Ma (Egbue y Kellog, 2010; Goyes, 2009; Sallarés et al., 2009; Pazmiño y Michaud, 2009; Geología y Física Marina y Terrestre del Ecuador, 2009).

La Cordillera tiene una forma alargada en dirección Oeste-Este (Figura 3.3), pudiendo extenderse bajo los Andes a 500 km de la trinchera. En su parte oceánica desde las Islas Galápagos hasta la fosa de subducción alcanza una longitud de 1350 km, con un ancho de 280 km en la zona de subducción y una elevación de 2000 m sobre la base oceánica de Nazca, es decir a 657 m de profundidad (Michaud et al., 2009; Goyes, 2009).

Posee coberturas sedimentarias que comprenden principalmente carbonatos, mostrando además varias irregularidades que influyen en su grado de acoplamiento. En su flanco Sur se

encuentran una serie de montes submarinos de forma cónica y con cima plana, mientras que en su flanco Norte presenta una morfología más inclinada.

Su área puede ser dividida en 3 regiones: 1) la Cordillera Oeste, que es parte de la Plataforma Volcánica Galápagos y estaría caracterizada por una actividad volcánica reciente, 2) la Depresión Central, que es un bajo topográfico de 2300 m de profundidad y muestra una reducción de material volcánico y 3) la Cordillera Este, que es una región de colinas con profundidades que varían desde 960 m a 2300 m, donde se puede encontrar la corteza más antigua de la Cordillera (Vaca et al., 2009; Michaud et al., 2009; Pazmiño y Michaud, 2009).

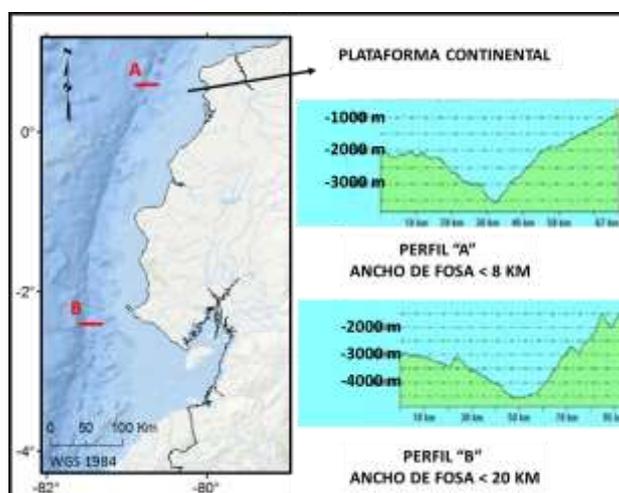
Numerosos estudios se han realizado tendientes a estimar la llegada de Carnegie a la trinchera, tales como: análisis de basamento levantado, volcanismo adakítico en el arco ecuatoriano o relación con la deriva hacia el NE del Bloque Norandino, de cuyas conclusiones se estima que la subducción de Carnegie iniciaría desde al menos 1.8 Ma (Egbue y Kellogg, 2010; Collot et al., 2009; Gutscher et al. 1999).

### 3.2.3 FOSA DE SUBDUCCIÓN.

La parte de la fosa oceánica ubicada frente a las costas ecuatorianas representa el inicio de la subducción de la placa oceánica de Nazca bajo el segmento continental, conformado por el Bloque Norandino y la placa Sudamericana.

Desde el Golfo de Guayaquil hasta el Cabo San Lorenzo, el eje de la fosa presenta una orientación general N10°E. A partir de este sector, frente a la provincia de Esmeraldas, el eje va cambiando su dirección hacia el Este, hasta una orientación general N38°E (Chunga et al., 2009; Zamora y Litherland, 1993).

Se han observado diferentes profundidades a lo largo de la fosa oceánica ecuatoriana (Figura 3.4) distribuidas de la siguiente manera: frente al Golfo de Guayaquil, al Sur de la Zona de Fractura Grijalva, la fosa alcanzaría una profundidad > 4700 m; continuando su recorrido hacia el Norte, entre 1°37'S y 0°2'N, la fosa se estrecharía y su profundidad disminuiría progresivamente hasta alcanzar los 2800 m frente a Cabo Pasado, aumentando nuevamente su profundidad hacia el Norte, hasta que alcanzaría los 3900 m frente a la provincia de Esmeraldas. Probablemente esta diferencia de profundidades se deba al efecto de la subducción de Carnegie (Goyes, 2009; Collot et al., 2009).



**Figura 3.4:** Perfiles de la fosa de subducción frente a las costas del Ecuador (modificada de Goyes, 2009).

La mayor cantidad de sedimentos que recibe la fosa son depositados al Norte y Sur del área de colisión de Carnegie y se estancan en mayor medida en los segmentos más profundos de la misma y en menor cantidad en la zona donde los montes submarinos colisionan con el margen continental (Goyes, 2009; Collot et al., 2009).

En la parte occidental de la fosa se encuentra la placa de Nazca, donde se destacan las siguientes características (Collot et al., 2009; Ratzov et al., 2009) (Figura 3.5):

- Presencia de la cordillera de Carnegie.
- Presencia de los montes submarinos Galera, Atacames y Salinas.
- Pendientes pronunciadas de la pared de la fosa en la zona de confluencia con la Fractura Grijalva, probablemente relacionadas con la deformación de las placas al inicio de la subducción.

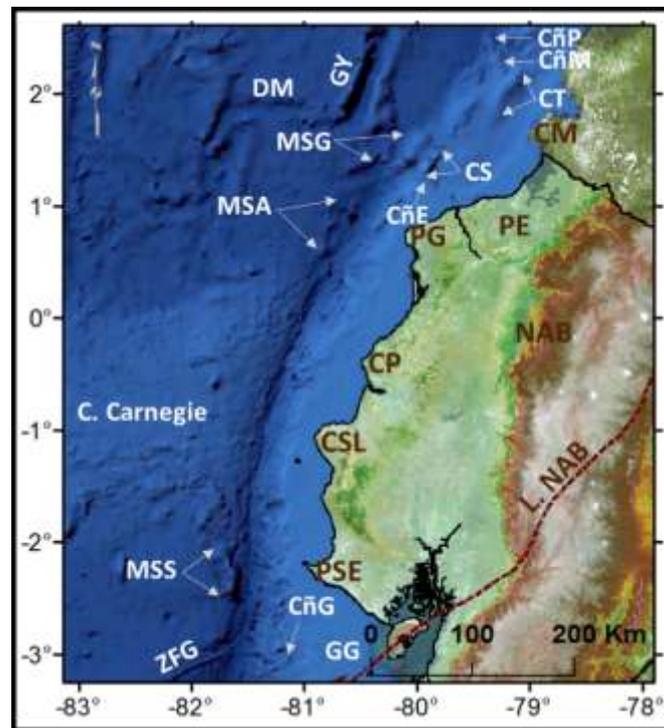
En la parte oriental de la fosa se encuentra el margen continental, cuyo basamento está conformado por terrenos oceánicos acrecionados (Collot et al., 2009; Ratzov et al., 2009). En él se destacan de Norte a Sur las siguientes particularidades (Figura 3.5):

- El Cañón de Paíta: tiene forma de U en su corte transversal y toma contacto con el Cañón de Mira.
- El Cañón de Mira: corta el margen continental hasta la fosa y es menos activo que el Cañón Esmeraldas.
- La Cordillera de Tumaco: estaría formada por cordilleras unidas por compresión tectónica, formando una zona de pliegues y cabalgamientos.
- La Cordillera de Same: tiene una elevación considerable, alcanzando un nivel menor a 150 m de profundidad.
- El Cañón de Esmeraldas: recibe gran cantidad de sedimentos que vienen transportados desde los Andes hasta la desembocadura del río Esmeraldas.
- El Cañón de Guayaquil: recibe sedimentos que son transportados desde los Andes por medio de los afluentes del Río Guayas.

La plataforma continental está cubierta por depósitos sedimentarios, siendo más ancha en el Golfo de Guayaquil, donde alcanza una extensión de 110 km y más angosta frente a la zona de subducción de Carnegie, donde el talud de la plataforma llega a la fosa a profundidades superiores a 1.500 metros. Esto sucede a pocos kilómetros de distancia de la línea de costa, siendo además notorio la presencia de penínsulas en la zona de costa más próxima a la trinchera (Figura 3.5), tales como: Península de Santa Elena, Cabo San Lorenzo, Cabo Pasado, Punta Galera y Cabo Manglares, que se encuentran separadas por áreas de bahías (Collot et al., 2009).

Al iniciar la subducción, una parte del movimiento de Nazca queda bloqueado bajo el margen continental, acumulando tensión que posteriormente se libera mediante eventos sísmicos. Estos eventos tendrían lugar dentro de un rango de profundidad que se extendería hasta, aproximadamente 40-50 km (Nocquet et al., 2009; Marcaillou et al., 2009). Este intervalo de profundidad se podría considerar como un límite entre zonas sismogénicas (Marcaillou et al., 2009).

En cuanto al sector donde colisiona Carnegie, entre 1°N en el sector de Punta Galera y 2°S en el sector de la Península de Santa Elena (Witt et al., 2006; Goyes, 2009), la subducción se acomodaría de manera diferente (Trenkamp et al., 2002), ya que la presencia de una elevación submarina sería un factor influyente en el incremento del acoplamiento interplaca. Aumenta así la tensión en la placa continental (Witt et al. 2006; Gutscher et al., 1999) y se deforma su topografía, como se puede observar en la morfología elevada de la zona costera y en la presencia de afloramientos de terrazas marinas cuaternarias (Collot et al., 2009).



**Figura 3.5:** Características dominantes en la fosa de subducción.

Notación: GY, Graben Yaquina; DM, Dorsal Malpelo; MSG, montes submarinos Galera; MSA, montes submarinos Atacames; MSS, montes submarinos Salinas; ZFG, zona de fractura Grijalva; CñP, cañón Paíta; CñM, cañón Mira; CT, cordillera submarina Tumaco; CS, cordillera submarina Same; CñE, cañón Esmeraldas; CñG, cañón Guayaquil; GG, Golfo de Guayaquil; PSE, península de Santa Elena; CSL, cabo San Lorenzo; CP, cabo Pasado; PG, península Galera; PE, provincia de Esmeraldas; CM, cabo Manglares; NAB, Bloque Norandino; L. NAB, límite del Bloque Norandino (Alvarado, 2012). Representados sobre un modelo digital del terreno (MDT) de 30 m.

### 3.2.4 GEOMETRÍA DE LA SUBDUCCIÓN.

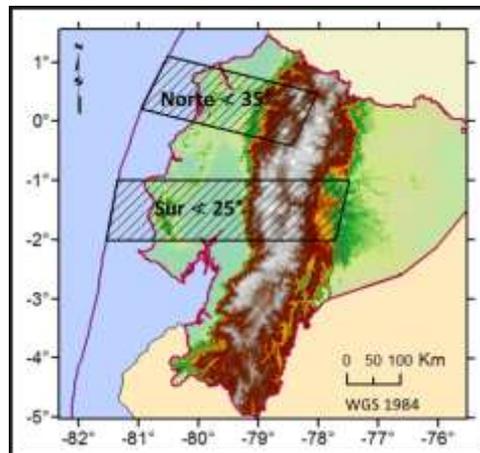
La placa oceánica más densa subduce bajo la placa continental, que es menos densa y de mayor espesor (Goyes, 2009). A pesar de que la convergencia oblicua de la placa de Nazca permanecería constante por al menos 5 Ma (Witt et al., 2006), existe heterogeneidad en su ángulo de inclinación.

Frente a las costas ecuatorianas la subducción parece estar altamente influenciada por la presencia de la Cordillera de Carnegie, cuya prolongación bajo la litósfera continental se podría extender bajo los Andes ecuatorianos, distinguiéndose sobre la corteza continental un amplio arco volcánico adakítico (Gutscher et al., 1999).

Existen numerosos trabajos relacionados con el buzamiento de la placa de Nazca bajo el territorio continental ecuatoriano, cuyos planteamientos han sido considerados en la

zonificación que más adelante se propone. Las conclusiones de estos trabajos se resumen a continuación.

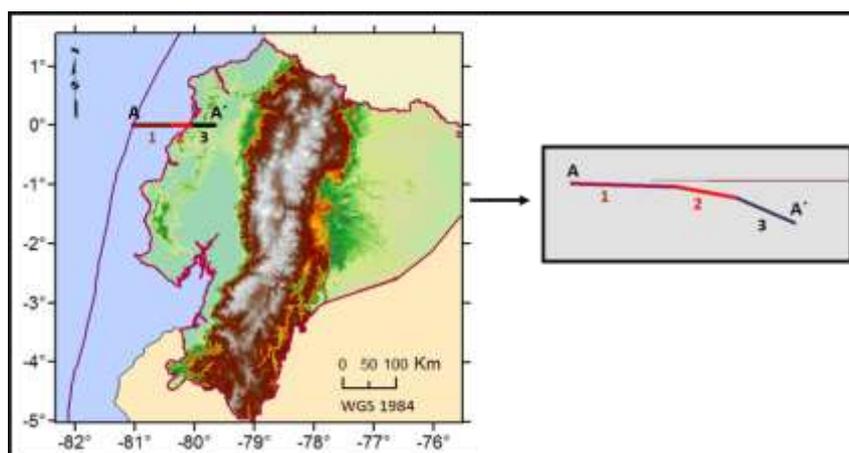
Guillier et al. (2001): exponen que la distribución espacial de la sismicidad de la placa oceánica, muestra un slab sumergiéndose hasta una profundidad de aproximadamente 200 km, con un ángulo de 35° en el Norte y 25° en el Sur; en un área de análisis que va desde 1°N a 2°S (Figura 3.6).



**Figura 3.6:** Esquema que muestra el ángulo de inclinación del slab de la placa oceánica en los segmentos Norte y Sur, según Guillier et al. (2001).

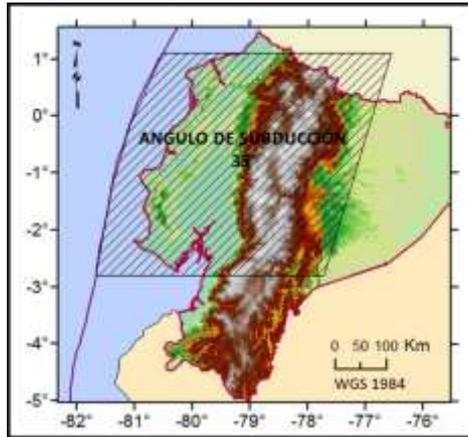
Trenkamp et al. (2002): proponen un buzamiento de la placa oceánica en dirección Este, diferenciado en un corte transversal realizado en lat. 0°, mostrando 3 segmentos, como se refleja en la Figura 3.7.

- Segmento 1: 6° hasta 6.9 km de profundidad.
- Segmento 2: 17° hasta 19.2 km de profundidad.
- Segmento 3: 35° hasta 50 km de profundidad.



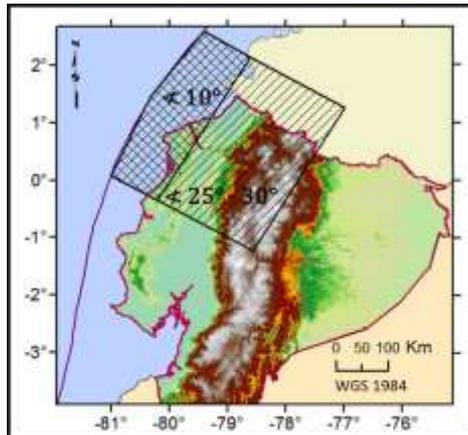
**Figura 3.7:** Esquema que representa el buzamiento en dirección Este de la placa oceánica propuesto por Trenkamp et al. (2002); en el corte transversal A-A'.

Penington (1981): muestra que la placa de Nazca buza con un ángulo de 35° en dirección Este, bajo una porción de los Andes, en el sector ecuatorial (Figura 3.8).



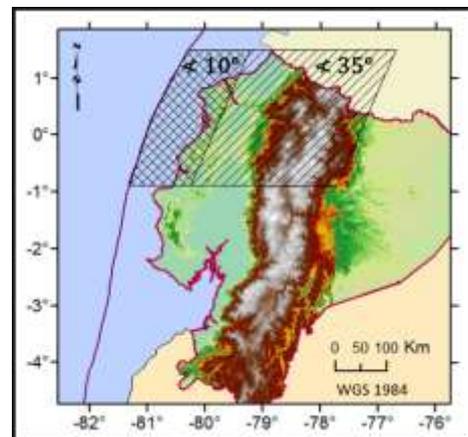
**Figura 3.8:** Esquema que representa el buzamiento en dirección Este de la placa de Nazca, mostrado por Penington (1981).

Manchuel et al. (2009): plantean que en la región de Esmeraldas, al norte de Ecuador, la inclinación del slab es de  $10^\circ$  al inicio de la subducción y se mantiene constante hasta 100 Km al Este de la fosa, para luego aumentar el ángulo de inclinación ( $25^\circ$ - $30^\circ$ ) hasta una distancia entre 300 a 400 km al Este de la trinchera, esto es, a 120 km de profundidad por debajo de la Cordillera Occidental de los Andes ecuatorianos (Figura 3.9).



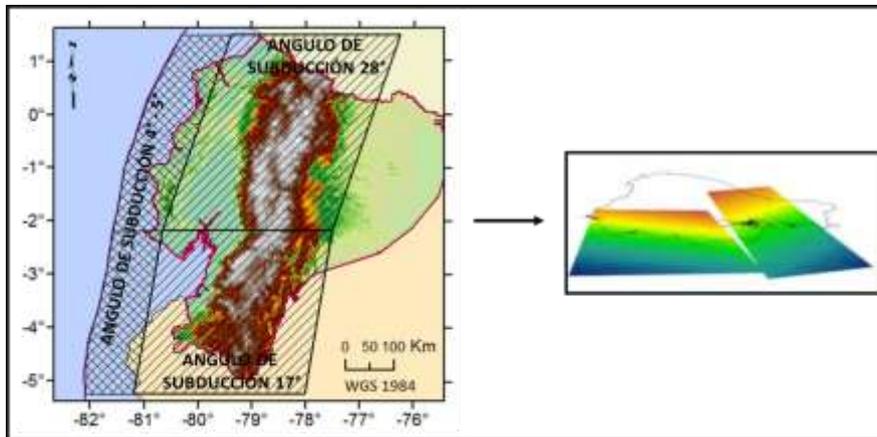
**Figura 3.9:** Esquema que representa la inclinación del slab planteada por Manchuel et al. (2009).

Pontoise y Manfret (2004): exponen un modelo de la geometría de la zona de Benioff, en el sector comprendido entre el norte de Manta y la frontera de Ecuador con Colombia, con dos ángulos de inclinación, el primero de  $10^\circ$  hasta aproximadamente 120 km al Este de la fosa y el segundo de  $35^\circ$  hasta las estribaciones orientales de la Cordillera de los Andes (Figura 3.10).



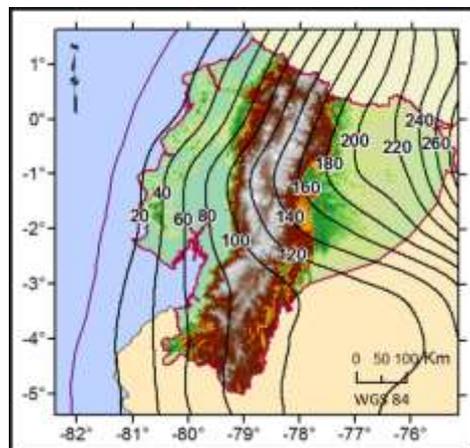
**Figura 3.10:** Esquema que representa el ángulo de inclinación del techo de la placa oceánica expuesto por Pontoise y Manfret (2004).

Chunga et al. (2009): proponen que la inmersión del plano de Benioff muestra un ángulo de 4°-5°, que se extiende desde la fosa oceánica hasta alcanzar una profundidad de 40-70 km, aumentando la inclinación más hacia el Este de esa profundidad, hasta alcanzar un ángulo de 17° en la zona Sur del país. Por otra parte, desde la Punta de Santa Elena hacia el norte, hasta la frontera con Colombia, se observa un ángulo de 28°, que se extiende hasta bajo las estribaciones orientales de los Andes ecuatorianos (Figura 3.11).



**Figura 3.11:** Esquema que representa la inmersión del plano de Benioff propuesto por Chunga et al. (2009).

Hayes et al. (2012): presentan un modelo de la geometría de la zona subducción, utilizando curvas de nivel en profundidad, donde se observa que en la parte Sur del Ecuador, el techo de la placa oceánica tiene un ángulo de inmersión menor que en el centro y norte del país (Figura 3.12).



**Figura 3.12:** Modelo de la geometría de la zona de subducción realizada por Hayes et al. (2012), mediante el uso de curvas de nivel en profundidad, equiespaciadas en intervalos de 20 km de profundidad.

### 3.2.5 BLOQUE NORANDINO.

El movimiento como un bloque de los Andes Norte (NAB) en el sector ecuatoriano, sería el resultado de la conjunción de varios factores, tales como: la subducción oblicua de la Placa de Nazca, el acoplamiento generado en la subducción, la competencia de la placa superior y el inicio en el proceso de subducción de la Cordillera de Carnegie (Beauval et al., 2010; Witt y Bourgois, 2009).

Se interpreta que la principal época de reorganización de los límites del NAB se encontraría entre el límite del Plioceno y Pleistoceno temprano (Witt et al., 2006).



La orientación del movimiento del NAB se propone en N35°E (Nocquet et al., 2009; Chunga et al., 2009). Considerando las estimaciones de diferentes autores, se puede apreciar una velocidad de movimiento en el rango de 6 a 10 mm/año (Egbue y Kellog, 2010; Segovia y Alvarado, 2009; Witt y Bourgois, 2009; Nocquet et al., 2009; Trenkamp et al., 2002).

### **3.2.6 GOLFO DE GUAYAQUIL.**

El movimiento hacia el NE del NAB, especialmente durante el Plioceno-Pleistoceno temprano, daría origen a una reorganización tectónica y crearía espacio para la subsidencia del Golfo de Guayaquil (Figuras 3.3 y 3.5), siendo una zona de importante deformación en el ante arco ecuatorial (Witt y Bourgois, 2009; Goyes, 2009; Collot et al., 2009; Witt et al., 2006).

El Golfo de Guayaquil evolucionaría a lo largo de la plataforma continental en dos períodos extensionales (Witt y Bourgois, 2009; Chunga et al., 2009):

- Primero durante el Mioceno-Plioceno, que estaría caracterizado por bajas tasas de subsidencia y sedimentación y que podría ser la consecuencia del posible inicio de la subducción de Carnegie y su probable influencia en el NAB.
- Segundo durante el Cuaternario, que estaría caracterizado por un incremento de la subsidencia y acumulación de sedimentos transportados principalmente por el río Guayas desde la Cordillera de los Andes.

En el Golfo de Guayaquil se observan sistemas distensivos en la corteza continental a través de fallamientos del tipo normal, como es el caso de las zonas de Posorja y Tumbes (Ec20 y Ec 21 de la Figura 3.13), donde se visualizan fallas normales de bajo ángulo, menores a 30°, que mostrarían un período principal de actividad en el Pleistoceno temprano (Chunga et al., 2009; Witt y Bourgois, 2009).

## **3.3 PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS.**

La delimitación de los accidentes naturales y su relación con la evolución y actual configuración de las estructuras geológicas en Ecuador, estarían influenciados mayormente por la dinámica de las características tectónicas presentes en la región.

Como se ha mencionado, Vera (2013) plantea que la evolución geológica que contribuyó a la formación de los Andes Ecuatorianos permite diferenciar 4 Territorios Tectónicos y 7 Provincias Geológicas.

Las Provincias Geológicas propuestas por Vera (2013) corresponden a la siguiente descripción (Figura 3.14):

Provincia 1: Cuenca del Oriente Norte conformada por corteza continental, cuya principal acumulación de sedimentación ocurriría desde el Cretáceo. Se extiende hacia el Oeste hasta

los ramales orientales de la Cordillera Real, mientras su límite Sur con la Provincia 2 se materializa mediante el pliegue de Cononaco.

Provincia 2: Cuenca Oriente Sur ubicada sobre corteza continental, que forma la parte más elevada de la cuenca del río Marañón y cuenta con importantes pliegues ubicados cerca de la Cordillera Real.

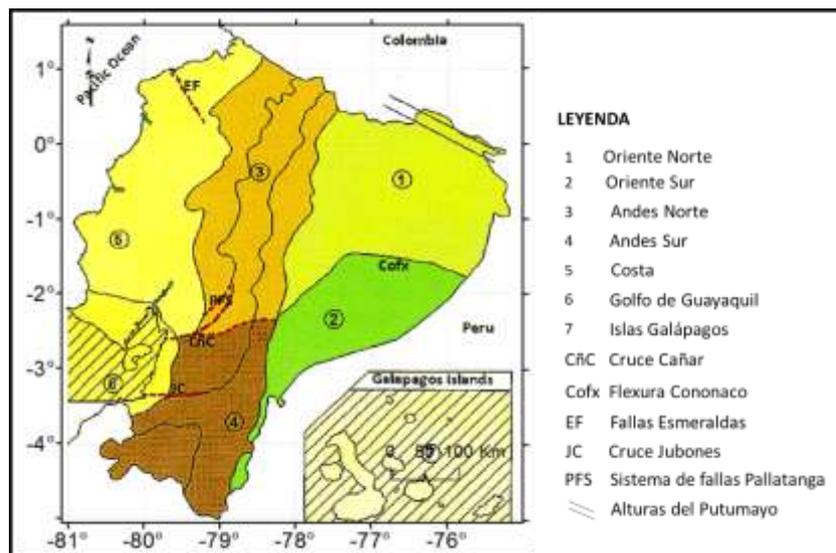
Provincia 3: Andes Norte, ubicada sobre un complejo de corteza continental-marina, que se extiende hacia el Sur hasta el Cruce de Cañar, comprende en su interior al Sistema de fallas Pallatanga, a las cuencas de Quito-Latacunga-Ambato-Riobamba y al arco marino Macuchi.

Provincia 4: Andes Sur, ubicada sobre corteza continental y un complejo de corteza continental-marina, en sus cuencas intramontanas se pueden encontrar depósitos marinos que podrían pertenecer a la Era Terciaria.

Provincia 5: Plataforma Costera, ubicada sobre corteza oceánica acretada.

Provincia 6: Golfo de Guayaquil, ubicado sobre corteza oceánica acretada. Su apertura limita entre el sistema Chongón-Colonche que forma parte de la corteza oceánica acretada y el extremo oeste del Macizo Molleturo.

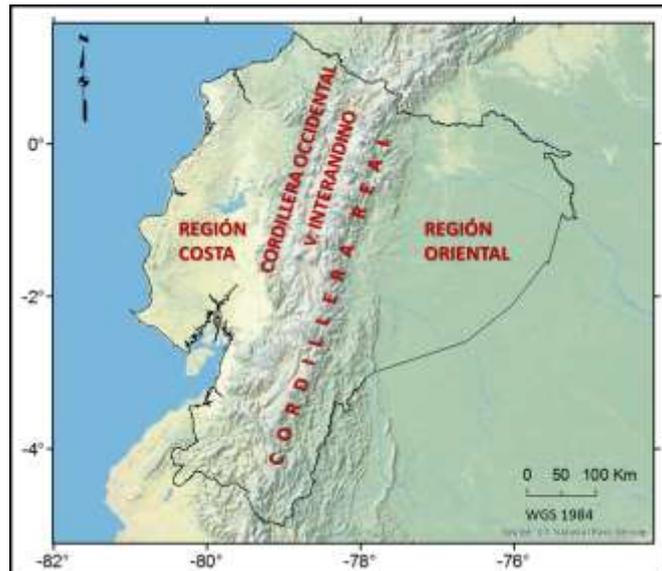
Provincia 7: comprende la plataforma de las Islas Galápagos.



**Figura 3.14:** Representación de las Provincias Geológicas (modificada de Vera 2013).

Por otra parte, Egüez et al., (2003) y SNGR (2013) reagrupan las provincias anteriores e identifican 3 regiones con características morfoestructurales diferentes (Figura 3.15):

1. Región costa o llanura costera.
2. Región montañosa o Cordillera de los Andes.
  - a. Cordillera Occidental.
  - b. Valle Interandino.
  - c. Cordillera Oriental o Real.
3. Región Oriental o Cuenca alta del Amazonas.



**Figura 3.15:** Regiones naturales del Ecuador.

A continuación, se describe con mayor detalle cada una de estas regiones.

### 3.3.1 REGIÓN COSTA O LLANURA COSTERA.

Formada sobre la corteza oceánica acretada, representa la zona de ante-arco o fore-arc (Egüez et al., 2003) y se extiende desde la línea de costa hasta una altura aproximada de 1200 m en la vertiente occidental de la Cordillera de los Andes. Su mayor anchura se presenta en la franja comprendida entre las latitudes 1° S y 2° 12' S, estrechándose progresivamente hasta la frontera con Perú.

Debido a la presión de la Placa de Nazca durante el Mioceno-Plioceno tardío, el Arco Insular Macuchi, que se habría formado ya en el Paleoceno-Mioceno (Vera, 2013) sería sobre empujado hacia el continente como parte de la corteza oceánica de la antigua placa Farallón, acretando y levantando a la región costera hacia el interior del continente, por lo cual, la corteza marina del período Cretácico formaría el basamento de las plataformas costeras (Witt et al., 2006).

Su evolución estaría marcada por el desarrollo de cuatro cuencas de ante-arco principales, de norte a sur (Figura 3.16): Borbón, Manabí, el Progreso y Golfo de Guayaquil; la subsidencia de las tres primeras iniciaría aproximadamente en el Mioceno temprano y éstas se localizan al norte de la cuenca Pleistocénica del Golfo de Guayaquil (Witt et al., 2006).

El proceso de subducción daría origen a la formación de colinas que forman la cordillera de Cojimíes al Norte y la cordillera de Chongón-Colonche (Figura 3.16), que se extiende en forma de arco paralela a la línea de costa, desde las inmediaciones de la ciudad de Guayaquil en dirección Norte hacia la provincia de Esmeraldas; su altitud máxima es de 850 m en la región del Cabo San Lorenzo, donde se observa la presencia de suelos molisoles (SNGR, 2013; IGM, 2013; Chunga et al., 2009; Pedoja et al., 2009; Witt et al., 2006).

En los sectores cercanos al mar se observan depósitos marinos que han dado lugar a la formación de playas, manglares y salitres; aquí se localiza la Formación Tablazo que se encuentra compuesta por secuencias de terrazas marinas del Plioceno tardío y alcanzan una

altura de 300 m, lo que evidencia un levantamiento tectónico que podría ser en parte la consecuencia del empuje de Carnegie y posterior subducción bajo el segmento continental (IGM, 2013; Chunga et al., 2009; Gutscher et al., 1999; Zamora y Litherland, 1993).

En el plano costero también se encuentran evidencias de la Formación Piñón, relacionadas con las cuencas de ante-arco de Borbón, Manabí y Progreso (Collot et al., 2009; Zamora y Litherland, 1993).



**Figura 3.16:** Características físicas dominantes de la Región Costa.

Notación: CB; cuenca de Borbón; CM, cuenca de Manabí; CP, cuenca de Progreso; GG, Golfo de Guayaquil; C. CH. C., cordillera de Chongón Colonche; C. C., cordillera de Cojimíes.

### 3.3.2 REGIÓN MONTAÑOSA O CORDILLERA DE LOS ANDES.

Tiene una longitud de aproximadamente 600 km de largo y un ancho aproximado de 175 km, con una altura media de 4000 m; la altura y el volumen de sus montañas decrece en dirección N-S (Figura 3.17).

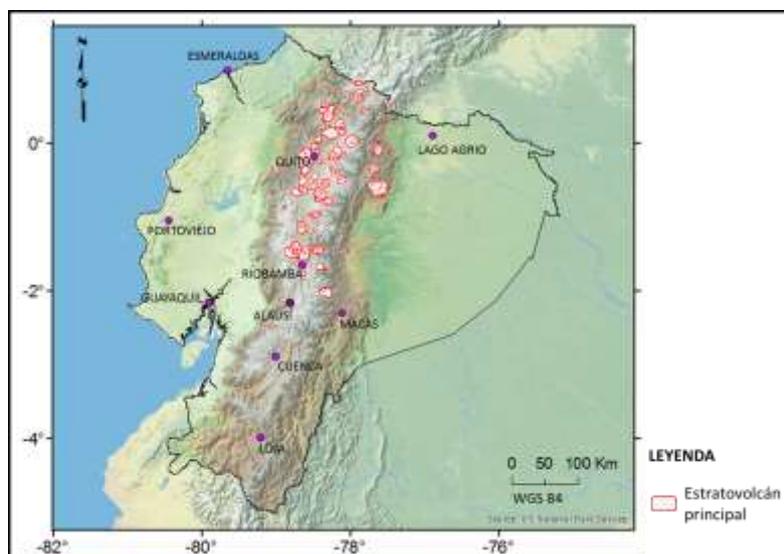
Su levantamiento y actual distribución geológica estarían relacionadas con una subducción activa y acreciones sucesivas, empezando a formarse probablemente en el Mesozoico o tal vez mucho antes (Pedoja et al., 2009; Egüez et al., 2003).

Las eras Precámbrico, Paleozoico y los períodos Triásico y Jurásico del Mesozoico, serían el núcleo de las provincias geológicas andinas, donde existen vestigios de corteza oceánica que corresponderían a una subducción más antigua, posiblemente perteneciente al período Jurásico (Vera, 2013).

Es una región de intensa deformación de corteza, donde se observa la presencia de sistemas de fallas que serían las responsables de los principales terremotos históricos en Ecuador (Beauval et al., 2010; Egüez et al., 2003). Se sugiere un espesor de la corteza bajo los Andes de 50 a 75 km (Guillier et al., 2001).

Desde el límite con Colombia hasta las inmediaciones de la población de Alausí, se distingue la presencia de materiales piroclásticos que cubren grandes extensiones de terreno y de 55 estructuras volcánicas Plio-Cuaternarias, posiblemente menores a dos millones de años (Figura 3.17). Entre ellas, al menos 25 han presentado erupciones durante los últimos 10 mil años y 7

han registrado erupciones recurrentes posteriores a la época de la conquista española desde 1534. Sin embargo, desde Alausí hacia el Sur, el relieve es de menor altura con la presencia de planicies altas (SNGR, 2013; IGM, 2013; Beauval et al., 2010; Rivadeneira et al., 2007; Zamora y Litherrland, 1993).



**Figura 3.17:** Distribución de estratovolcanes cuaternarios en un MDT de 30m (ubicación de estratovolcanes: Zamora y Litherrland, 1993).

### 3.3.2.1 Cordillera Occidental.

Constituida por rocas antiguas volcano-sedimentarias, su inicio se ubica al Sur a la altura del Golfo de Guayaquil y se proyecta hacia el Norte. Está conformada por terrazas oceánicas probablemente acretadas desde el Jurásico tardío y el Arco Insular Macuchi que empujaría hacia el Este a la parte continental costera ecuatoriana, desde posiblemente el Mioceno-Plioceno. La elevación y actual configuración de los Andes sería completada con la formación de volcanes Plioceno-Cuaternarios, en cuyas proximidades se pueden encontrar depósitos terciarios marinos (Vera, 2013; Egüez et al., 2003; Guillier et al., 2001).

### 3.3.2.2 Valle Interandino.

Son depresiones geomorfológicas o valles, también denominadas hoyas o nudos que se forman entre las cadenas montañosas, creando una morfología en forma de escalera. Generalmente llevan el nombre del río principal que contienen, con un ancho no mayor a 30 km y una elevación comprendida entre 2200 y 3000 m. Este conjunto de hoyas forma el Callejón Interandino conocido también como Avenida de los Volcanes (Vera, 2013; IGM, 2013).

Los valles ubicados desde la población de Alausí hacia el norte, se encuentran cubiertos con depósitos piroclásticos y volcanoclásticos Cuaternarios, mientras hacia el Sur se observan amplias cuencas entre montañas con rellenos sedimentarios (SNGR, 2013; Beauval et al., 2010).

Se sugiere que el movimiento del NAB durante los pasados 5-6 Ma, fue un factor influyente en el desarrollo de las cuencas Interandinas que evolucionarían en un régimen tectónico transpresivo que probablemente inició en el Mioceno tardío (Witt et al., 2006).

### **3.3.2.3 Cordillera Oriental o Real.**

Formada por rocas antiguas que se habrían acretao desde el Precámbrico en dirección E-W (Figura 3.15), esta cordillera incluye secuencias metamórficas, granitoides Triásicos y conjuntos sedimentarios y volcánicos Jurásicos. Esta acreción iniciaría en el Escudo de Tiputini localizado en el extremo occidental del Escudo de Guayana, que ocasionaría que cada nuevo terreno haya ido cubriendo y deformando a los anteriores (Vera, 2013; Egüez et al., 2003).

En su pendiente occidental se pueden apreciar afloraciones que involucran a terrenos continentales, placa oceánica y arcos de isla acretaos posiblemente durante el inicio de la era Terciaria, desde hace aproximadamente 58 a 38 Ma (Guillier et al., 2001).

La principal orogénesis de esta Cordillera ocurriría desde el final del Cretácico por la presión de la corteza marina que colisionó, emergió y empujó a la corteza continental, por lo cual es más antigua y más alta que la Cordillera Occidental. Al sur del cruce del Cañar (-2° 30' de Latitud Sur) (Figura 3.14), la Cordillera Real es mucho más baja porque están ausentes las estructuras volcánicas Cuaternarias (Egüez et al., 2003).

### **3.3.2.4 Región Oriental o Cuenca alta del Amazonas.**

Representa la zona de tras-arco o back-arc, se extiende desde el pie de la vertiente oriental de los Andes hacia el Este y ocupa un área de aproximadamente 131.000 km<sup>2</sup>. Las rocas Precámbricas y Paleozoicas constituirían la base de estos territorios, que además estarían conformados por rocas sedimentarias Mesozoicas (Egüez et al., 2003).

Al Norte se encuentra el Levantamiento Napo, donde se identifica un ramal de los Andes o una tercera cordillera, que parte desde el límite fronterizo Ecuador-Colombia en dirección Sur hasta el río Pastaza. Aquí se ubican los volcanes Pan de Azúcar, Sumaco y el volcán Reventador (Figura 3.37), que es el volcán andesítico más activo de la región Oriental (Vera, 2013; SNGR, 2012; Beauval et al., 2010; Egüez et al., 2003).

Al Sur se ubican la Cordillera del Cutucú, que se extiende desde el río Pastaza al Norte y la Cordillera del Cóndor, que se extiende desde el Río Santiago (Figura 3.37).

Un sistema de fallas transpresional de tendencia NE-SW a lo largo de la vertiente oriental de los Andes parece acomodar parcialmente la compresión E-W ocasionada por la subducción (Egüez et al., 2003), observándose además sismicidad que se extiende hacia el Este del Arco Volcánico (Gutscher et al., 1999).



## **Capítulo 4**

# **ESTIMACIÓN DE LA PELIGROSIDAD SÍSMICA**



## 4.1. INTRODUCCIÓN.

El capítulo inicia con la identificación de las fuentes de actividad sísmica, considerando para ello el análisis de las características geológicas y tectónicas realizado en el capítulo anterior, lo que permitirá posteriormente relacionar la información de eventos sísmicos con su pertenencia a cada una de ellas.

Posteriormente se elaborará un catálogo sísmico, que compendie información de estudios específicos sobre terremotos históricos y eventos registrados instrumentalmente por diferentes agencias en la región de estudio.

En el catálogo así obtenido se homogenizará su parámetro de tamaño a magnitud momento, para posteriormente depurarlo de réplicas y premonitores mediante el uso de ventanas espacio-temporales calibradas propiamente para el estudio, finalmente se realizará un análisis de completitud, para estimar los años a partir de los cuales se considera que la información en cada rango de magnitud es completa.

A continuación se realizará una propuesta de zonas sismogénicas para el cálculo de la peligrosidad sísmica, a partir de la información generada, de propuestas de zonificaciones anteriores y de la aportación del criterio de expertos. De esta manera se obtendrá un modelo de zonas para cada régimen tectónico (cortical, subducción interfase y subducción profunda), considerando particularmente el planteamiento de la geometría de la subducción realizado en este estudio y su consistencia con la información sísmica generada.

Seguidamente se caracterizará la actividad sísmica presente en cada zona, para ello se ajustará la sismicidad localizada en cada una de ellas a un modelo de recurrencia, para posteriormente obtener los parámetros de sismicidad mediante el método de máxima verosimilitud, utilizando la propuesta publicada por Weichert (1980).

Se ha dedicado una especial atención en la estimación de la magnitud máxima en cada zona, teniendo en cuenta la incertidumbre de este parámetro, por lo que la magnitud máxima no se considerará como un valor único, sino que se modelizará mediante una distribución de probabilidad uniforme entre un límite inferior y un umbral superior.

Para las zonas corticales se utilizará la información de las fallas existentes, con el fin de estimar magnitudes con criterio geológico, como consecuencia de la ruptura de la mismas, mientras que para las zonas de subducción interfase e in-slab, se ha analizado la tendencia que sigue la sismicidad hacia sus valores máximos.

Al no disponer de acelerogramas registrados en Ecuador como para desarrollar un modelo local o para una hacer una calibración de modelos foráneos con datos locales, se realizará un análisis de publicaciones relacionadas, con la finalidad de elegir las ecuaciones de predicción de movimiento fuerte formuladas para subducción y corteza en el mundo que mejor se ajusten al ambiente tectónico que se observa en Ecuador.

Tomando como input los parámetros característicos de las zonas y las leyes de atenuación seleccionadas, se procederá al cálculo de la peligrosidad sísmica, siguiendo un planteamiento

probabilista PSHA zonificado, el uso del programa CRISIS 2012 v5.5 para el cálculo y el uso de programa ArcGIS 10.1 para la edición de los resultados.

Finalmente se obtendrán mapas de peligrosidad en términos de PGA y SA (1s), para períodos de retorno de 475, 975 y 2475 años y resultados específicos para cuatro capitales de provincia, expresados por curvas de peligrosidad para 6 parámetros representativos del movimiento fuerte (PGA, SA (0.1, 0.2, 0.5, 1 y 2s)), espectros de peligrosidad uniforme, para tres períodos de retorno (475, 975 y 2475 años) y la desagregación de la peligrosidad para los movimientos objeto dados por la PGA y SA (1s), para los periodos de retorno de 475 y 2475 años, obteniendo así los terremotos de control que más contribuyen a la peligrosidad en cada ciudad, para cortos y largos periodos estructurales y probabilidades de excedencia del 10 y 2 % en 50 años.

## 4.2. IDENTIFICACIÓN DE FUENTES SÍSMICAS.

Del análisis de las principales características tectónicas, geológicas y físicas en la región de estudio, descrito en el capítulo anterior, junto con el aporte de expertos en reuniones mantenidas en el Centro de Investigaciones Científicas de la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE Quito-Ecuador, el Instituto Oceanográfico de la Armada Guayaquil-Ecuador, el Instituto Espacial Ecuatoriano Quito-Ecuador y en la Universidad Politécnica de Madrid-España, se han definido las siguientes fuentes generadoras de sismos (Figura 4.1):

1. Fuente sísmica de interfase: se encuentra al inicio de la subducción, diferenciándose de la subducción más profunda en los siguientes aspectos:
  - a) Es en ésta zona donde se bloquea parte del movimiento de Nazca, lo que ocasionaría la deformación de la placa más densa que subduce, acreción del margen continental y acumulación de tensión (Egbue y Kellog, 2010).
  - b) El ángulo de inmersión del techo de la placa oceánica ( $4^{\circ}$ - $10^{\circ}$ ) es menor al de la subducción más profunda, extendiéndose hasta una distancia de 100-120 km al Este de la fosa (Manchuel et al., 2009; Chunga et al., 2009; Trenkamp et al., 2002), que marcaría el inicio de la fuente sísmica in-slab.

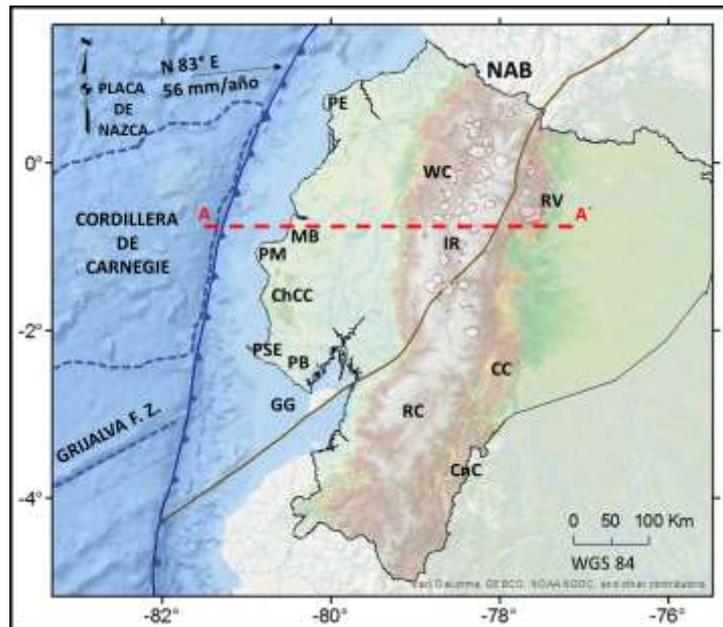
Se estima que la profundidad de ésta fuente sísmica alcanzaría desde unos pocos kilómetros, hasta aproximadamente 40-70 km (Marcaillou et al., 2009; Chunga et al., 2009; Collot et al., 2009; Michaud et al., 2009; Goyes, 2009; Pazmiño y Michaud, 2009).

2. Fuente sísmica in-slab: se extendería desde el límite de la fuente sísmica de interfase hasta 400-500 km al Este de la trinchera y a una profundidad aproximada de 200 km (Michaud et al., 2009; Goyes, 2009, Guillier et al., 2001).

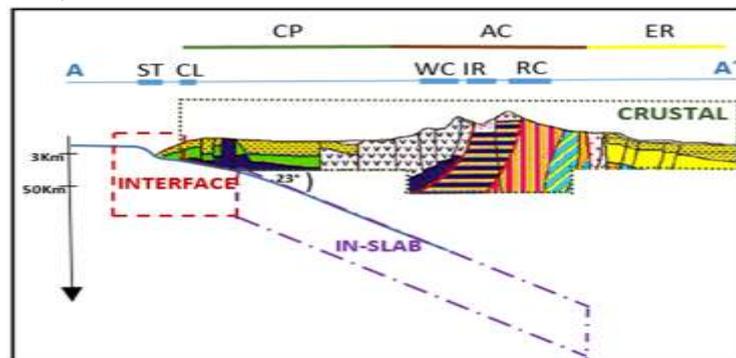
Su dinámica se observaría por la ocurrencia de sismicidad a diferentes niveles de profundidad y la presencia de un amplio arco volcánico adakítico en los Andes Ecuatorianos (Collot et al., 2009; Pedoja, 2009; Gutscher et al., 1999). La pendiente del slab presentaría una mayor inclinación que la subducción interfase, cuyo ángulo variaría en el rango de  $17^{\circ}$ - $35^{\circ}$ , siendo más superficial al Sur del Ecuador y más inclinada y profunda al centro y norte del país (Manchuel et al., 2009; Chunga et al., 2009; Trenkamp et al., 2002; Guillier et al., 2001).

3. Corteza continental: su inicio al Oeste se localiza en el margen continental y se encuentra constituida por la placa continental y el NAB, que tendría una dirección de movimiento NE, posiblemente a través de un sistema de fallas activo (Chunga et al., 2009; Egüez et al., 2003; Trenkamp et al., 2002). Se considera que el proceso de subducción es un factor influyente en la geomorfología de la corteza, en la que se identifica: una zona costera que alcanzaría una profundidad de 40 km (Alvarado, 2012; Chunga et al., 2009), una zona de Cordillera cuyo espesor alcanzaría los 50 a 75 km de profundidad (Egüez et al., 2003; Guillier et al., 2001) y una zona oriental que conforma la cuenca alta del Amazonas.

a)



b)



**Figura 4.1:** Fuentes de actividad sísmica identificadas.

a) Esquema de la Tectónica y principales fuentes sísmicas identificadas en la región de estudio. Notación: NAB: Bloque Nor Andino; NABL: Límite del Bloque Nor Andino (tomado de Alvarado 2012); A - A': Corte transversal en latitud  $-1^{\circ}$ ; Grijalva F. Z.: Zona de Fractura Grijalva; PE: Península de Esmeraldas; PM: Península de Manabí; PSE: Península de Santa Elena; GG: Golfo de Guayaquil; BB: Cuenca de Borbón; MB: Cuenca de Manabí; PB: Cuenca de Progreso; ChCC: Cordillera Chongón Colonche; WC: Cordillera Occidental; IR: Región Interandina; RC: Cordillera Real; RV: Volcán Reventador; CC: Cordillera de Cutucú; CnC: Cordillera del Cóndor.

b) Esquema de las zonas generadoras de sismos Interface, In-slab y Cortical, representado en el corte transversal A - A'; se presenta un esquema de las principales unidades geológicas según Vera (2013);

Notación: CP: Plano Costero; AC: Cordillera de los Andes; ER: Región Oriental; ST: Trinchera de subducción; CL: Línea de Costa; WC: Cordillera Occidental; IR: Región Interandina; RC: Cordillera Real.

## 4.3. PREPARACIÓN DE INPUTS DE CÁLCULO.

### 4.3.1. ELABORACIÓN DEL CATÁLOGO SÍSMICO.

Se ha elaborado un catálogo sísmico actualizado, con información procedente de estudios específicos sobre terremotos históricos y de eventos registrados instrumentalmente por diferentes agencias.

Después de fusionar la información consultada en una base de datos, se ha realizado una primera revisión con la finalidad de evitar la duplicidad de los registros, para posteriormente homogenizar el parámetro de tamaño a magnitud momento Mw.

A continuación, se ha desarrollado la depuración de réplicas y premonitores identificados por medio de ventanas espacio temporales calibradas propiamente para el estudio, basándose en la metodología propuesta por Gardner y Knopoff (1974).

Finalmente se ha realizado un análisis de completitud, para estimar los años a partir de los cuales la información en cada rango de magnitud puede considerarse completa.

El esquema de trabajo que se ha seguido para la elaboración del catálogo de proyecto es mostrado en la Figura 4.2:

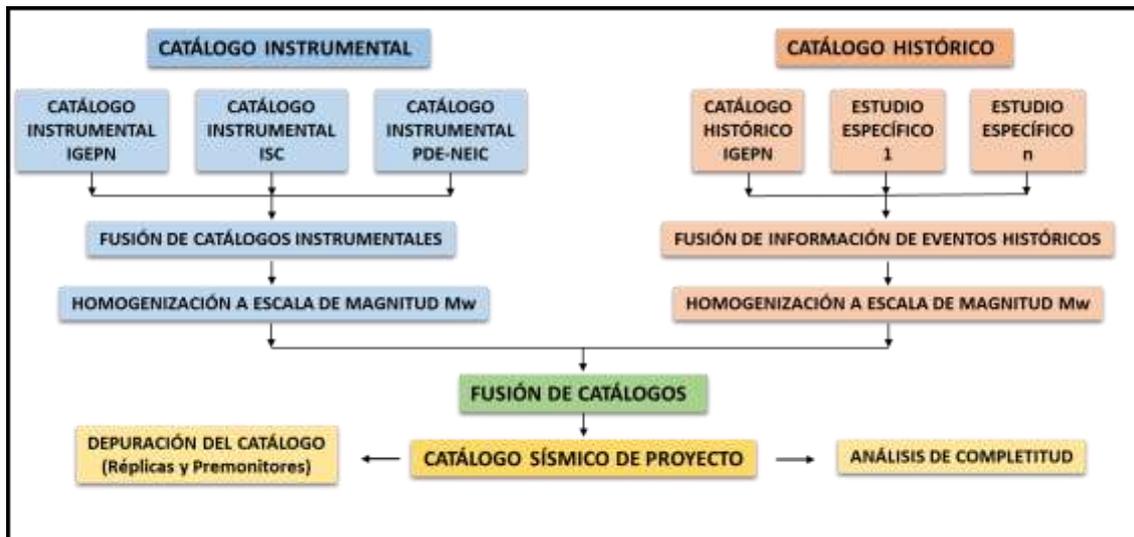


Figura 4.2: Esquema de trabajo para la elaboración del Catálogo Sísmico de Proyecto.

#### Catálogo instrumental.

Para la elaboración del Catálogo Instrumental, que corresponde a la colección de registros de eventos sísmicos publicados por diferentes agencias, se han consultado las siguientes fuentes:

- Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional de Quito-Ecuador (IGEPN): es un centro de investigación gubernamental dedicado al diagnóstico y a la vigilancia de peligros sísmicos y volcánicos en Ecuador.



Pone a disposición dos opciones para la obtención de información:

1. ISC Bulletin: que contiene datos desde 1.904 hasta la actualidad.
2. Reviewed ISC Bulletin: que parte de la base de datos del ISC Bulletin, pero sus eventos son revisados automática y manualmente y en caso necesario son relocalizados.

En las dos opciones enunciadas anteriormente, se han obtenido los siguientes resultados:

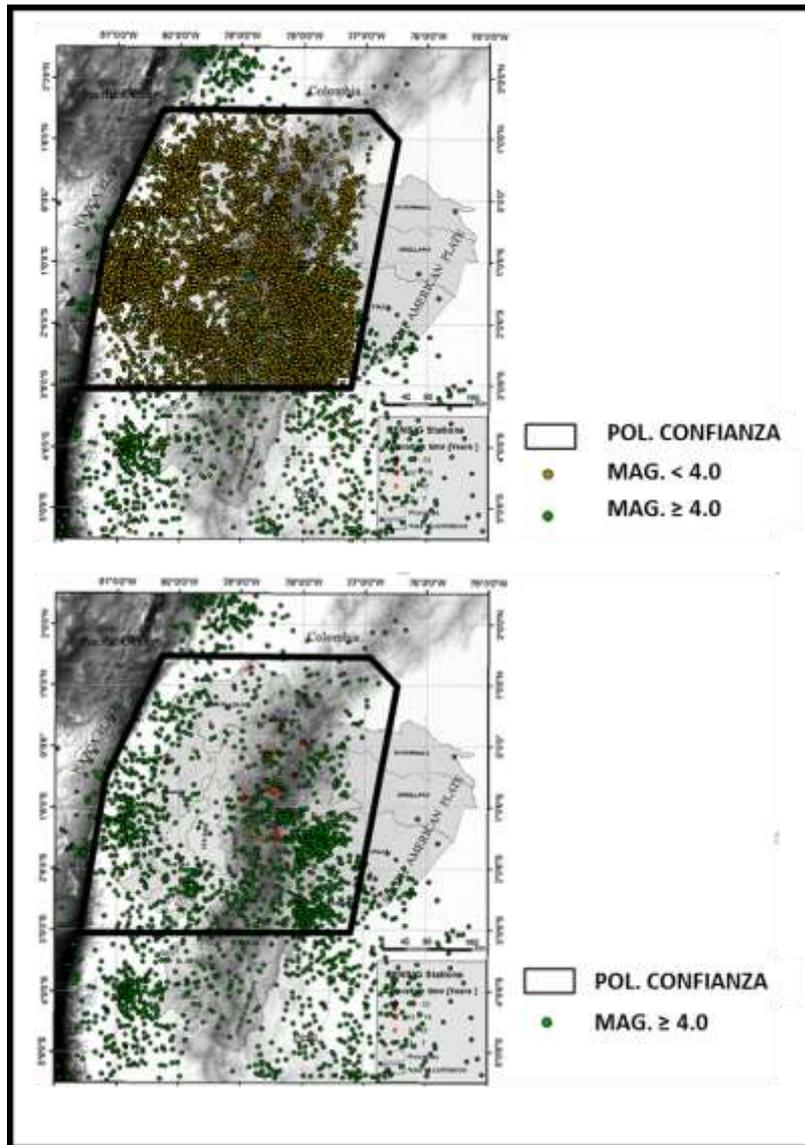
1. Reviewed ISC Bulletin (RISCB): se han obteniendo soluciones para 356 eventos, en el período comprendido desde enero de 2010 hasta noviembre (inclusive) de 2011.
  2. ISC Bulletin (ISCB): se han obtenido soluciones para 434 eventos, en el período comprendido desde diciembre de 2011 hasta junio (inclusive) de 2014.
- Finalmente, con el objetivo de complementar la información sísmica en el área especificada, se han consultado las soluciones de sismos incluidas en el National Earthquake Information Center Preliminary Determination of Epicenters (NEIC-PDE) del US Geological Survey, esta agencia determina la localización y tamaño de terremotos alrededor del mundo y difunde la información de manera pública. Se ha obtenido así, información sísmica en el período comprendido desde enero de 2010 hasta abril (inclusive) de 2014

Un resumen del contenido de los tres boletines, donde se muestra el período de cobertura, rango de magnitud y número de eventos por escala de magnitud utilizada se incluye en la Tabla 4.1.

**Tabla 4.1:** Resumen de los datos de eventos sísmicos extraídos de los catálogos del IGEPN, RISCB, ISCB Y NEIC-PDE.

AGENCIA	FECHA INICIAL	FECHA FINAL	Mmin	Mmax.	Nº eventos	Nº por escala de magnitud
IGEPN	07/01/1901	30/12/2009	3.0	8.8	10823	M (1), mB (2), mb (2946), MD (7541), MS (58), Mw (253) y UK (22)
RISCB	02/01/2010	30/11/2011	3.0	6.3	356	mb (354) y ML (2)
ISCB	03/12/2011	16/06/2014	3.0	7.0	434	mb (109), mbtmp (9), ML (57), Mw (259)
NEIC-PDE	03/12/2011	07/02/2013	4.0	7.3	70	mb (66), mwb (1) mwc (1) y mww (2)

Al graficar los eventos sísmicos consultados (Figura 4.4), se observa que en el área de cobertura confiable para soluciones estimadas por la red sismológica RENSIG (Figura 4.3), existe una evidente concentración de eventos cuya magnitud es inferior a 4.0. Esta particularidad se debe a que, en la elaboración del catálogo proporcionado por el IGEPN, las soluciones de eventos sísmicos de magnitudes bajas, que se ubican fuera de ésta ventana espacial, no son fiables y por lo tanto no son incluidas en su catálogo (Beauval et al., 2013).



**Figura 4.4:** Representación de los registros sísmicos instrumentales consultados (modificada de Beauval et al., 2013).

Para el cálculo de la peligrosidad sísmica se hace necesario delimitar el catálogo a una cierta zona de influencia, considerando que los sismos dentro de ella puedan ser representativos en la peligrosidad de la zona de estudio. Además, se debe fijar una magnitud mínima, por debajo de la cual se considera que los sismos no contribuyen al nivel de movimiento cuya excedencia se evalúa. En nuestro caso se considera una magnitud mínima de 4.0.

Un primer análisis de la base de datos con la información integrada de las diversas agencias ha llevado a la necesidad de realizar una depuración de eventos, eliminando aquellos repetidos, aunque con diferentes soluciones reportadas por las distintas agencias. Para ello se han revisado los eventos contenidos en ventanas temporales de 2 minutos y espaciales de 100 km en distancia.

El 98% de los eventos reportados por el NEIC-PDE se repiten en el catálogo del ISC Bulletin. Dado que el ISC para determinar sus soluciones usa información proporcionada por una mayor cantidad de estaciones (Beauval et al., 2013), se ha decidido seleccionar los eventos reportados por ISC con prioridad a los del NEIC-PDE, a excepción de 17 eventos, cuya

información se encuentra incompleta en el parámetro de “profundidad”. En estos casos se ha optado por seleccionar las soluciones proporcionadas por NEIC-PDE.

Debido a la variabilidad de agencias que reportan los eventos, la información obtenida se presenta en diversas escalas de magnitud, por lo que, una vez fusionada la información instrumental en un solo catálogo y eliminadas las soluciones repetidas, se ha procedido a homogenizar el parámetro de tamaño a magnitud momento ( $M_w$ ). Se ha escogido este tipo de escala ya que no se satura para eventos sísmicos grandes como los que se encuentran en la región (Hanks y Kanamori, 1979) y además es la escala empleada en la mayoría de los actuales modelos de predicción del movimiento, GMPE’s.

Para el proceso de homogenización se han aplicado diferentes correlaciones. Engdahl y Villaseñor (2002) proponen los siguientes criterios:

- Para terremotos profundos las magnitudes reportadas en  $M_s$  son equivalentes a  $M_w$ ,  $m_B$  y  $m_b$  (en orden de preferencia).
- Las estimaciones de magnitud listadas por Abe, (1981, 1984) (Catálogo de grandes terremotos, mayormente de magnitud 6.8 y superiores; 1897 a 1980) y por Pacheco y Sykes, (1992) (catálogo completo y uniforme de terremotos del mundo con magnitudes  $M_s$  de 7.0 y superiores a profundidades menores o iguales a 70 km; 1900-1989) son consistentes con las estimaciones en  $M_w$  de Harvard.
- Los eventos tomados del libro de Gutenberg y Richter, Seismicity of the Earth, (1954), Rothé, (1969), (Catálogo de terremotos del mundo con magnitudes 5.5 o superiores en un período de 1953 – 1965) y Pasadena antes de 1960 (Magnitudes reportadas por el California Institute of Technology, Pasadena, USA), son 0.2 unidades de magnitud más grandes que las correspondientes de Abe (1981, 1984).
- Verifica la correspondencia existente entre eventos comunes reportados en  $M_w$  por Pacheco y Sykes (1992) y  $M_s$  por Abe (1981) para magnitudes superiores a 7.0.

Utsu (2002) realiza el análisis entre varios tipos de escalas y su correspondencia con la escala  $M_w$ . En la Figura 4.5 se representa la relación entre  $M_w$  con  $m_{bISC}$  y  $m_{bPDE}$ , utilizando datos publicados por ISC y NEIC PDE en un período temporal desde 1964 hasta 1995 a diferentes profundidades. De su análisis concluye que  $m_b$  da valores ligeramente más grandes a partir de  $M_w > 7$ ; por lo tanto, se estima una equivalencia entre  $M_w$  con  $m_{bISC}$  y  $m_{bPDE}$  hasta una magnitud  $m_b$  de 6.5.

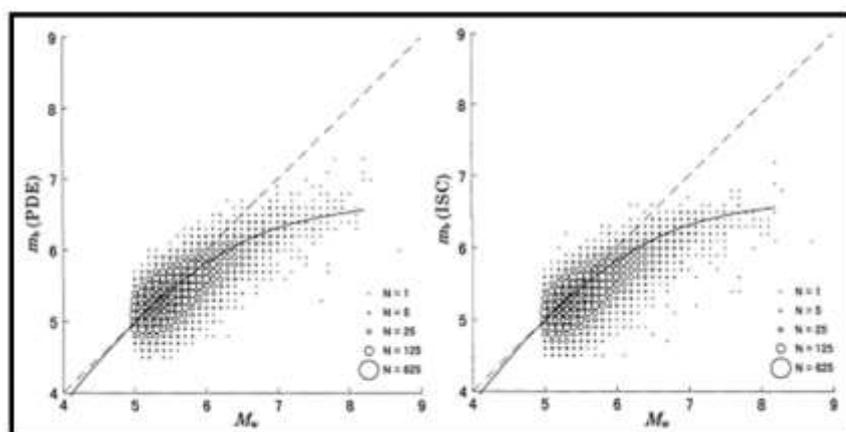
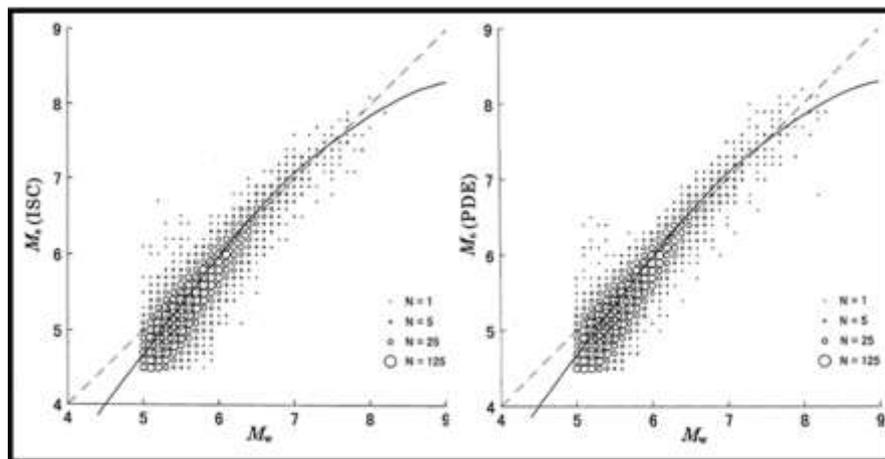


Figura 4.5: Relación entre  $M_w$  con  $m_{bISC}$  y  $m_{bPDE}$  (tomadas de Utsu, 2002).

Beauval et al. (2013) realizan una comparación entre eventos comunes reportados con magnitud  $M_D$  y  $m_{bISC}$ , concluyendo su equivalencia. Por tanto, ambas magnitudes serían equivalentes a  $M_w$  para valores menores a 6.5.

Para la relación entre  $M_{SISC}$ ,  $M_{SPDE}$ , y  $M_w$ , Utsu (2002) concluye que los datos ajustan generalmente bien (Figura 4.6), por lo que se puede deducir su equivalencia considerando que para valores menores a aproximadamente  $M_s$  6.2 su correspondiente  $M_w$  es algo más grande. Lo mismo sucede de una manera más notoria con valores superiores a aproximadamente  $M_s$  7.8. Beauval et al. (2013) consideran una equivalencia entre  $M_w$  y  $M_s$  hasta una magnitud de 8.0. Por lo anteriormente enunciado se podría estimar una equivalencia entre  $M_s$  y  $M_w$  hasta un valor de  $M_s$  7.8.



**Figura 4.6:** Relación entre  $M_w$  con  $M_{SISC}$  y  $M_{SPDE}$  (tomadas de Utsu, 2002).

Existen 9 eventos cuya escala de magnitud desconocida (identificados en el catálogo como UK), en un rango de 5.8-6.9. Al no disponer de soluciones publicadas por otras agencias que permitan identificar sus escalas de magnitud, se ha asumido que esos valores corresponden a magnitud momento ( $M_w$ ).

Para el evento ocurrido el 31/01/1906, se ha asignado un valor de  $M_w$  8.8, según datos de un estudio específico publicado por Beauval et al. (2013).

Para 6 eventos descritos en escala de magnitud local ( $M_L$ ), en un rango de tamaño de 4.0-4.3, se ha aplicado la correlación propuesta en Benito et al. (2010) al analizar el Catálogo Sísmico de El Salvador, donde la principal causa de sismicidad es ocasionada por la subducción de la placa de Cocos bajo la del Caribe:

$$M_w = 0.821M_L + 0.8975 \quad (4.1)$$

El efecto de la aplicación de la correlación en los eventos enunciados, implica un aumento de 0.1 de unidad en sus valores originales.

## **Catálogo Histórico.**

Con la finalidad de que el catálogo sísmico agrupe la mayor cantidad de información disponible para el área de interés, se ha procedido a elaborar un catálogo histórico que comprende eventos reportados que no han sido registrados instrumentalmente.

Este trabajo se ha realizado mediante la recopilación y análisis de estudios específicos publicados sobre determinados sismos que se indican a continuación.

Rivadeneira et al. (2007) hacen mención a 17 terremotos históricos, dando referencias de ubicación, fecha e intensidad máxima alcanzada.

Beauval et al. (2010) enfocan su estudio en los terremotos corticales históricos ocurridos en la Cordillera de los Andes ecuatorianos, en un período comprendido entre 1587-1976 y presentan los resultados obtenidos de 16 de ellos, asignando valores de magnitud momento equivalentes a sus Intensidades.

Alvarado (2012) hace referencia a 13 de los 16 eventos determinados en Beauval et al. (2010) e igualmente determina una aproximación a  $M_w$  a partir de los resultados publicados en Beauval et al. (2010).

Beauval et al. (2013) realizan un análisis de terremotos históricos estimando localizaciones epicentrales y rangos de  $M_w$  para cada evento.

El Catálogo Histórico proporcionado por el IGEPN incluye información de 29 eventos sísmicos que abarcan un periodo de 1587 a 1976. Los valores de magnitud asignados a cada terremoto son coincidentes con los valores de  $M_w$  estimados en Beauval et al. (2010) y Alvarado (2012).

Finalmente, de manera similar al proceso de elaboración del catálogo instrumental, se ha realizado la fusión de la información de eventos históricos consultados, evitando la duplicidad de eventos y considerando que ninguno de los catalogados como históricos sea repetido en la información instrumental.

En los casos en que se han identificado eventos repetidos, la prioridad de selección de la información se ha realizado en base a la fecha de publicación del estudio, priorizando los reportes más recientes.

En la Tabla 4.2 se presenta el resultado del proceso de confección del catálogo histórico. Cabe recalcar, que no ha sido necesario aplicar una relación de equivalencia entre valores de Intensidad y Magnitud, dado que en los trabajos descritos anteriormente se presentan estimaciones en  $M_w$ . Existen cuatro eventos que no tienen asignado hora de ocurrencia.

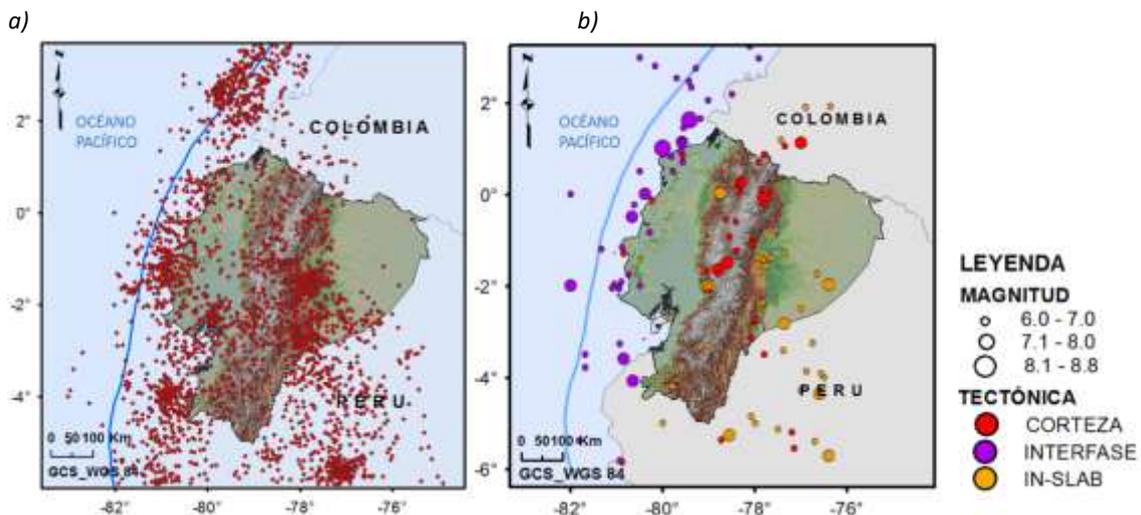
**Tabla 4.2:** Catálogo histórico del proyecto, generado a partir de estudios y reportes específicos.

ID	CAT.	FECHA	HORA	LAT.	LON.	DEPTH	SRCLOC.	Mw	SRCMAG.
1H	IGEPN	1587/08/31	1:30	0.05	-78.3	10	IGEPN	6.4	Beauval et al. (2010)
2H	IGEPN	1645/03/15	x	-1.73	-78.8	10	IGEPN	7.0	IGEPN
3H	IGEPN	1674/08/29	x	-1.67	-79.1	10	IGEPN	6.4	IGEPN
4H	IGEPN	1687/11/22	x	-1.25	-78.4	10	IGEPN	6.2	IGEPN
5H	IGEPN	1698/06/20	06:00	-1.65	-78.8	10	IGEPN	7.3	Alvarado (2012)
6H	IGEPN	1736/12/06	08:00	-0.75	-78.8	10	IGEPN	5.9	IGEPN
7H	IGEPN	1757/02/22	x	-0.92	-78.6	10	IGEPN	6.1	IGEPN
8H	IGEPN	1786/05/10	15:00	-1.68	-78.8	10	IGEPN	5.8	IGEPN
9H	IGEPN	1797/02/04	12:45	-1.5	-78.6	10	IGEPN	7.6	Beauval et al. (2010)
10H	IGEPN	1834/01/20	01:45	1.12	-77.0	10	IGEPN	7.4	IGEPN
11H	IGEPN	1859/03/22	13:30	0.02	-78.8	10	IGEPN	7.2	Beauval et al. (2010)
12H	IGEPN	1868/05/17	18:00	-1.25	-78.4	10	IGEPN	6.1	IGEPN
13H	IGEPN	1868/08/15	19:30	0.7	-77.9	10	IGEPN	6.6	Beauval et al. (2010)
14H	IGEPN	1868/08/16	06:40	0.25	-78.3	10	IGEPN	7.3	Alvarado (2012)
15H	IGEPN	1911/09/23	04:10	-1.73	-78.8	10	IGEPN	6.2	Alvarado (2012)
16H	IGEPN	1914/05/31	13:27	-0.6	-78.4	10	IGEPN	6.4	Alvarado (2012)
17H	IGEPN	1923/02/05	12:22	-0.55	-78.6	10	IGEPN	6.1	IGEPN
18H	IGEPN	1923/12/14	10:31	0.88	-77.8	10	IGEPN	6.1	IGEPN
19H	IGEPN	1926/12/18	18:05	0.87	-77.8	10	IGEPN	6.0	IGEPN
20H	IGEPN	1929/07/25	08:39	-0.5	-78.5	10	IGEPN	5.9	Alvarado (2012)
21H	IGEPN	1938/08/10	02:02	-0.4	-78.4	10	IGEPN	5.8	Beauval et al. (2010)
22H	IGEPN	1944/09/15	19:20	-0.71	-78.7	10	IGEPN	5.7	Alvarado (2012)
23H	IGEPN	1953/12/23	04:45	1.05	-77.4	10	IGEPN	6.0	IGEPN
24H	IGEPN	1955/07/20	21:00	0.28	-78.4	10	IGEPN	6.1	Alvarado (2012)
25H	IGEPN	1958/01/24	13:50	-0.98	-78.6	10	IGEPN	5.0	Beauval et al. (2010)
26H	IGEPN	1960/07/30	02:04	-1.2	-78.7	10	IGEPN	5.7	Alvarado (2012)
27H	IGEPN	1961/04/08	09:03	-2.089	-79.0	10	IGEPN	6.3	IGEPN
28H	IGEPN	1962/11/16	06:39	-1.16	-78.7	10	IGEPN	5.9	Alvarado (2012)
29H	IGEPN	1976/11/29	23:20	-0.52	-78.6	10	IGEPN	5.0	Beauval et al. (2010)

Notación: CAT., catálogo; LAT., latitud; LON., longitud; SRCLOC., fuente de localización; SRCMAG., fuente de magnitud.

### Catálogo Sísmico de proyecto.

El catálogo sísmico elaborado para este proyecto de tesis cubre un espacio temporal que comienza en 1587 y se extiende hasta junio de 2014. Contiene 2879 eventos que se han agrupado en tres bases de datos asociadas a los tres regímenes tectónicos definidos en el apartado 4.2 de este estudio: cortical, subducción interfase y subducción profunda o in-slab. Para ésta asociación se ha tomado en cuenta la ubicación de cada evento. Su distribución gráfica se muestra en la Figura 4.7 y el número de eventos que queda englobado en cada régimen tectónico se indica en la Tabla 4.3.



**Figura 4.7:** Representación del Catálogo Sísmico. a) Epicentros del Catálogo confeccionado en el presente estudio, con  $M_w \geq 4.0$ ; b) Epicentros de los sismos con  $M_w \geq 6.0$ . El color asignado simboliza el régimen tectónico al que se asocia cada evento.

**Tabla 4.3:** Resumen de eventos del Catálogo Sísmico agrupados por régimen tectónico.

FUENTE SÍSMICA	CANTIDAD DE EVENTOS
CORTICAL	970
IN-SLAB	769
INTERFASE	1140
<b>TOTAL</b>	<b>2879</b>

De un primer análisis se ha podido observar que la mayoría de los eventos (93%) corresponden a una magnitud  $M_w \leq 5.5$ , mientras que el 0.9% corresponde a magnitudes  $M_w \geq 7.0$ .

La gran mayoría de los registros (97%) se refieren a los eventos ocurridos desde la década de 1960, Figura 4.8, coincidiendo con una significativa expansión de las redes sismológicas internacionales.

El rango de magnitud que abarca el catálogo oscila entre  $M_w 4.0$  y  $8.8$ , siendo esta última la mayor magnitud estimada en época instrumental, correspondiente a un sismo ocurrido en enero de 1906 y localizado entre la línea de costa y la trinchera de subducción.

Existen 14 eventos anteriores a 1900 en el rango de magnitudes de  $M_w 6.1-7.6$ . Desde 1900 hasta la actualidad, los eventos más grandes están asociados con las fuentes de subducción y se localizan a lo largo del plano costero noroccidental del país.

La distribución de la sismicidad muestra dos fuentes principales, una relacionada con la subducción de la placa de Nazca y otra relacionada con el fallamiento presente en la corteza, que es la fuente de terremotos históricos localizados en la Cordillera de los Andes, donde se ubican importantes ciudades ecuatorianas (p. e. Quito, Riobamba, Cuenca).

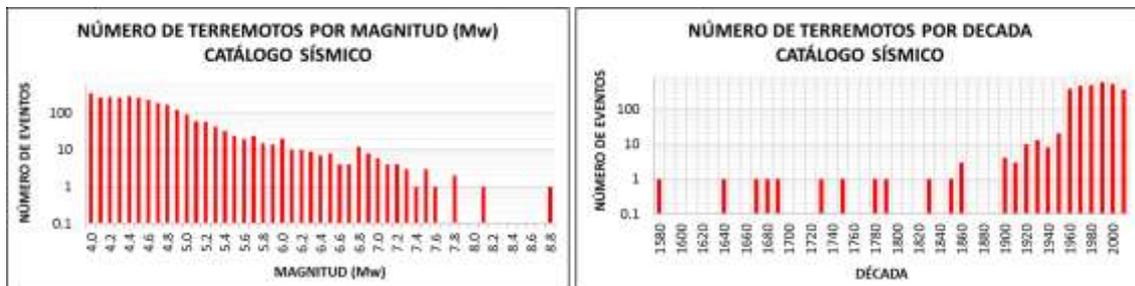


Figura 4.8: Distribución de la sismicidad del Catálogo Sísmico.

### Depuración del catálogo.

Dado que la estimación de la peligrosidad se realizará con un enfoque probabilista zonificado, se asume que la sismicidad en cada zona se ajusta a un modelo de Poisson, es decir que la probabilidad de ocurrencia de terremotos en un período dado sigue una distribución aleatoria. Esto implica que los eventos sean independientes unos de otros, por lo que es necesario identificar series sísmicas y eliminar del catálogo las réplicas y premonitores asociados a cada evento principal.

Entre las propuestas más utilizadas para realizar esta depuración, se pueden mencionar las de Reasenberg (1985) y Gardner y Knopoff (1974) (en adelante GK 74), siendo esta última la que se aplicará en el presente estudio.

El método de GK 74 fija límites espaciales y temporales en función de la magnitud del terremoto principal de una serie sísmica. De ésta manera todos los terremotos de magnitud menor o igual a la del principal y en un rango temporal y espacial prefijado, son considerados dependientes del mismo y por lo tanto deberán eliminarse.

Los rangos espaciales y temporales se establecen por medio de funciones logarítmicas relacionadas a la magnitud del terremoto principal, cuya forma es la siguiente:

$$\log T = a_1 M + b_1 \quad (4.2)$$

$$\log L = a_2 M + b_2 \quad (4.3)$$

donde,

L: es la distancia (km).

T: es el tiempo (días).

M: es la magnitud del terremoto principal (Mw).

$a_1$ ,  $b_1$ ,  $a_2$  y  $b_2$ : son constantes numéricas que se determina por análisis de regresión a partir de series conocidas.

Aplicando estas funciones sobre catálogos concretos, se establecen ventanas espacio-temporales que constituyen límites de tiempo y distancia, bajo los cuales los eventos son considerados réplicas en el análisis de una secuencia sísmica (Figura 4.9).

En el caso del límite relacionado con el tiempo, los autores proponen dos pendientes distintas, asignando una pendiente menor a partir de la magnitud 6.4.

En el presente estudio, considerando el análisis descrito, se ha realizado un ajuste a las ventanas propuestas por GK 74 utilizando la información generada en el Catálogo Sísmico.

El proceso se ha iniciado con la detección de posibles series sísmicas, utilizando como referencia inicial las ventanas espacio-temporales propuestas por GK 74. A continuación, con la utilización de la aplicación ArcMap del programa ArcGIS 10.1, se ha realizado un análisis detallado, en cada régimen tectónico por separado (Tabla 4.3), de la secuencia de ocurrencia de cada uno de los eventos. Se han revisado de manera particular aquellos eventos que en un tiempo T y en una distancia L, se encuentran asociados al sismo de mayor tamaño, con las siguientes consideraciones:

- Tamaño de cada sismo dado en Mw.
- Tiempo T y distancia L referenciales, determinados a partir del tamaño del terremoto más grande y las envolventes propuestas por GK74.
- Identificación del tiempo transcurrido máximo desde la ocurrencia del sismo principal hasta la ocurrencia de su última réplica.
- Identificación de la distancia máxima alcanzada desde la ubicación geográfica del sismo principal, hasta la ubicación de su réplica más lejana.

Como resultado de éste proceso se han identificado series sísmicas, a partir de las cuales se ha obtenido un registro en cada una de ellas, de la distancia más grande alcanzada entre las réplicas y el evento principal, así como del tiempo máximo transcurrido desde la ocurrencia del terremoto principal hasta la última réplica.

Con éstos datos se ha podido estimar el valor de las constantes numéricas en las formas propuestas por GK 74, obteniendo las siguientes relaciones:

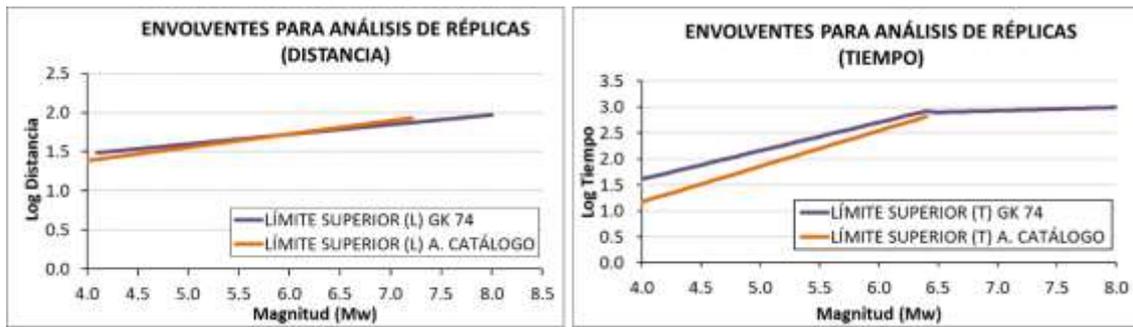
$$\log T = 0.68 M - 1.57 \quad (4.4)$$

$$\log L = 0.17 M + 0.70 \quad (4.5)$$

El resultado de la aplicación de las relaciones estimadas en el presente estudio y de las relaciones propuestas en GK 74 se muestra en la Figura 4.9.

Como se puede observar, el límite superior en distancia propuesto por GK 74 y el estimado por análisis del Catálogo Sísmico es bastante similar, tanto en magnitudes bajas como en magnitudes altas.

Una situación algo diferente se muestra en los límites de temporales, donde para magnitudes bajas el límite de GK 74 es algo superior, pero a medida que la magnitud alcanza valores más grandes los límites van aproximándose.



**Figura 4.9:** Límites superiores en Distancia y Tiempo para delimitar las ventanas en las cuales se localizan réplicas de un sismo principal, en función de la magnitud del mismo. En azul se representan los límites propuestos por GK 74 y en naranja los resultantes de la calibración a partir del catálogo sísmico confeccionado en este estudio.

Dado que GK 74 plantea un valor menor de la pendiente para magnitudes mayores a 6.4, en base a estimaciones mejoradas de la forma del límite superior. Dado que en el catálogo sísmico no se dispone de suficiente información de series sísmicas cuyos terremotos principales tengan una  $M_w \geq 6.4$ , que permitan realizar un ajuste mejorado para las magnitudes mayores, se ha optado por adoptar el valor de la pendiente propuesta por GK 74 a partir de la magnitud indicada y se ha realizado la depuración del Catálogo Sísmico, obteniendo los siguientes resultados (Tabla 4.4):

**Tabla 4.4:** Porcentaje de réplicas y terremotos principales en el Catálogo Sísmico.

RÉGIMEN	Envolventes por análisis del CS.					Envolventes GK 74				
	PRIN.	REP.	TOT.	PRIN. %	REP. %	PRIN.	REP.	TOT.	PRIN. %	REP. %
CORTICAL	665	305	970	68.6	31.4	634	336	970	65.4	34.6
INTERFASE	722	418	1140	63.3	36.7	658	482	1140	57.7	42.3
IN-SLAB	675	94	769	87.8	12.2	631	138	769	82.1	17.9
<b>TOTAL</b>	<b>2062</b>	<b>817</b>	<b>2879</b>	<b>71.6</b>	<b>28.4</b>	<b>1923</b>	<b>956</b>	<b>2879</b>	<b>66.8</b>	<b>33.2</b>

Notación: PRIN.: principales; REP.: réplicas; CS Catálogo sísmico.

Un trabajo similar de depuración de réplicas y premonitores es presentado en Beauval et al. (2013), utilizando los algoritmos propuestos por Reasenberg (1985), con variantes en tiempo y distancia, obteniendo como resultado un porcentaje total de réplicas en el rango del 21 al 32%.

Considerando los resultados obtenidos al aplicar las envolventes deducidas por análisis del catálogo sísmico, las envolventes propuestas por GK 74 y las estimaciones alcanzadas por Beauval et al. (2013), se ha decidido continuar el proceso de cálculo con las ventanas espacio-temporales estimadas por el análisis del catálogo del presente estudio.

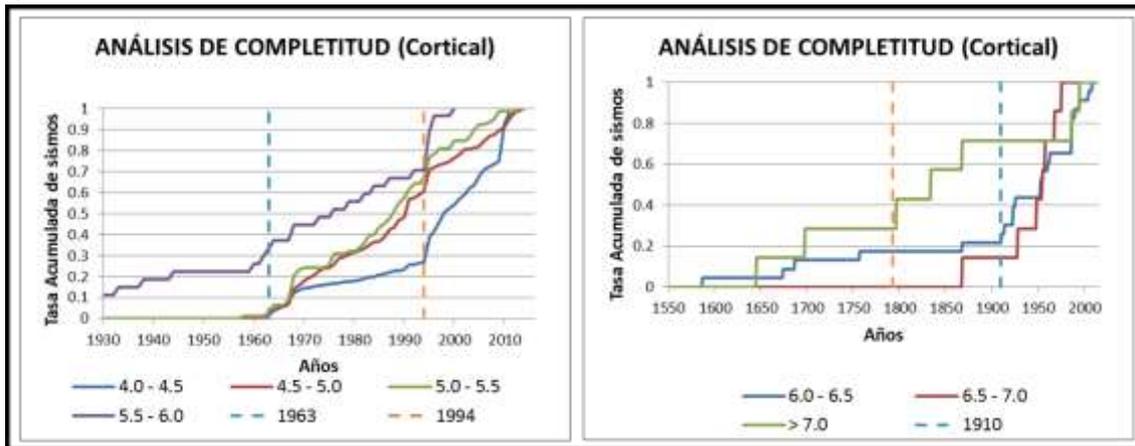
#### **Análisis de completitud del catálogo.**

Como se había mencionado en el apartado 2.1, es necesario estimar el año de referencia a partir del cual es razonable suponer que los sismos de un determinado intervalo de magnitud han sido registrados completamente. De esta manera se podrá realizar la corrección por falta de completitud de la información contenida en el Catálogo Sísmico, teniendo en cuenta la pérdida de registros de los sismos de menor magnitud a medida que nos remontamos en el tiempo.

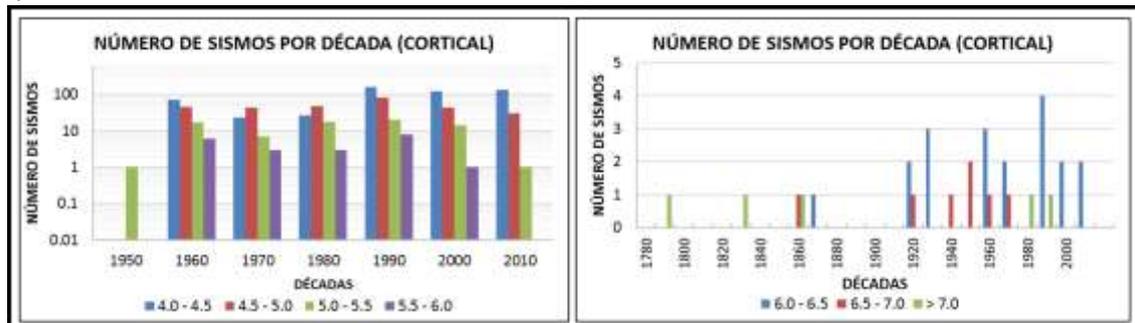
Para éste proceso se ha empleado el método propuesto por Stepp (1973), que consiste en representar acumulativamente el número de sismos de diferentes rangos de magnitud en función del tiempo, con el fin de identificar el año a partir del cual la pendiente de la curva resultante es aproximadamente constante. Esta pendiente refleja la tasa que puede considerarse completa para cada intervalo de magnitud.

Un primer análisis se ha realizado utilizando los eventos sísmicos corticales, agrupados en intervalos de medio grado de magnitud, obteniendo las siguientes representaciones (Figura 4.10):

a)



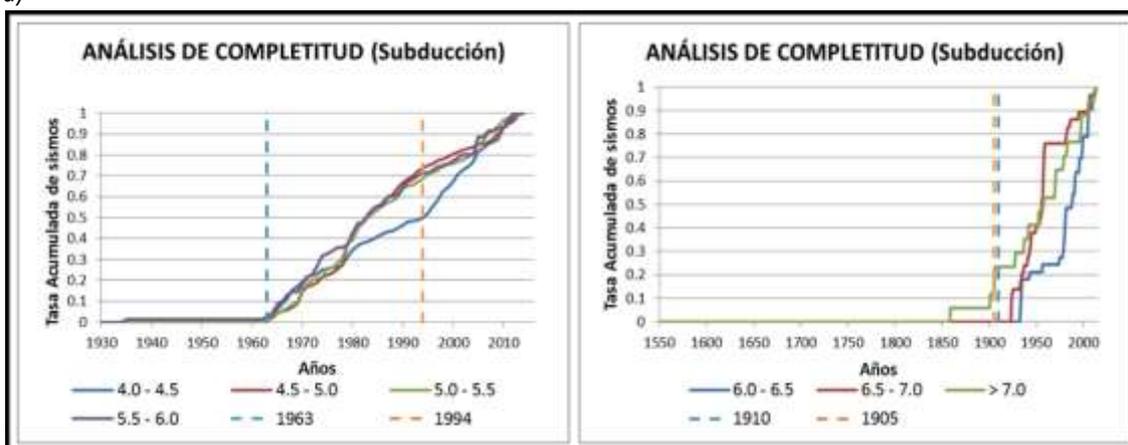
b)



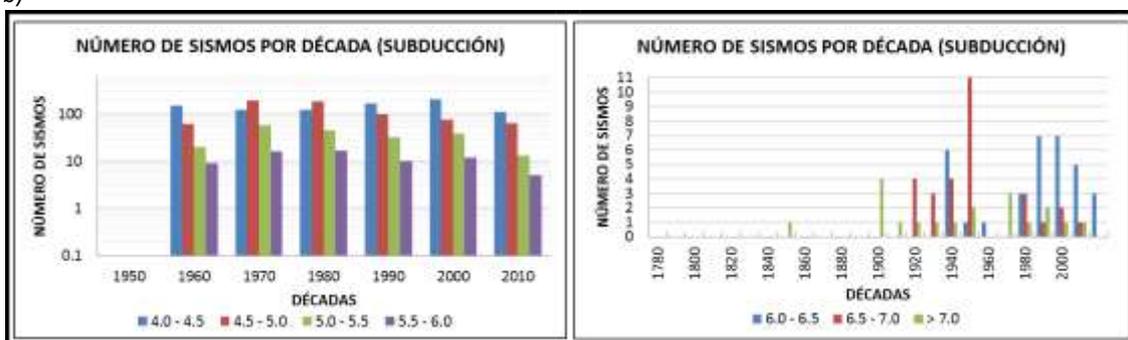
**Figura 4.10:** a) Análisis de completitud de sismos corticales. Se representa la tasa acumulada de sismos, para cada intervalo de magnitud (de 0.5) en función del tiempo; b) Representación de la cantidad de registros sísmicos y período de ocurrencia por década, agrupados por intervalos de medio grado de magnitud.

Un segundo análisis se ha realizado utilizando los eventos sísmicos localizados en subducción, agrupados también en intervalos de medio grado de magnitud, obteniendo las siguientes representaciones (Figura 4.11):

a)



b)



**Figura 4.11:** a) Análisis de completitud de sismos de subducción. Se representa la tasa acumulada de sismos, para cada intervalo de magnitud (de 0.5) en función del tiempo; b) Representación de la cantidad de registros sísmicos y tiempo de ocurrencia por década, agrupados por intervalos de medio grado de magnitud.

Del análisis de las representaciones realizadas, se han identificado los años de referencia desde los cuales se considera que el registro de la sismicidad es completo, para cada intervalo de magnitud (Tabla 4.5).

**Tabla 4.5:** Años de referencia que establecen los períodos de completitud para diferentes intervalos de magnitud.

Intervalos de Magnitud ( $M_w$ )	Años de referencia	
	Corteza	Subducción
4.0 - 4.5	1994	1994
4.5 - 5.0	1963	1963
5.0 - 5.5	1963	1963
5.5 - 6.0	1963	1963
6.0 - 6.5	1910	1910
6.5 - 7.0	1910	1910
> 7.0	1793	1905

El año de referencia para magnitudes  $M_w \leq 4.5$ , tiene relación con la época en que la red sísmica del Instituto Geofísico del Ecuador, provee soluciones para terremotos de magnitudes bajas, que complementarí la información publicada por otras agencias.

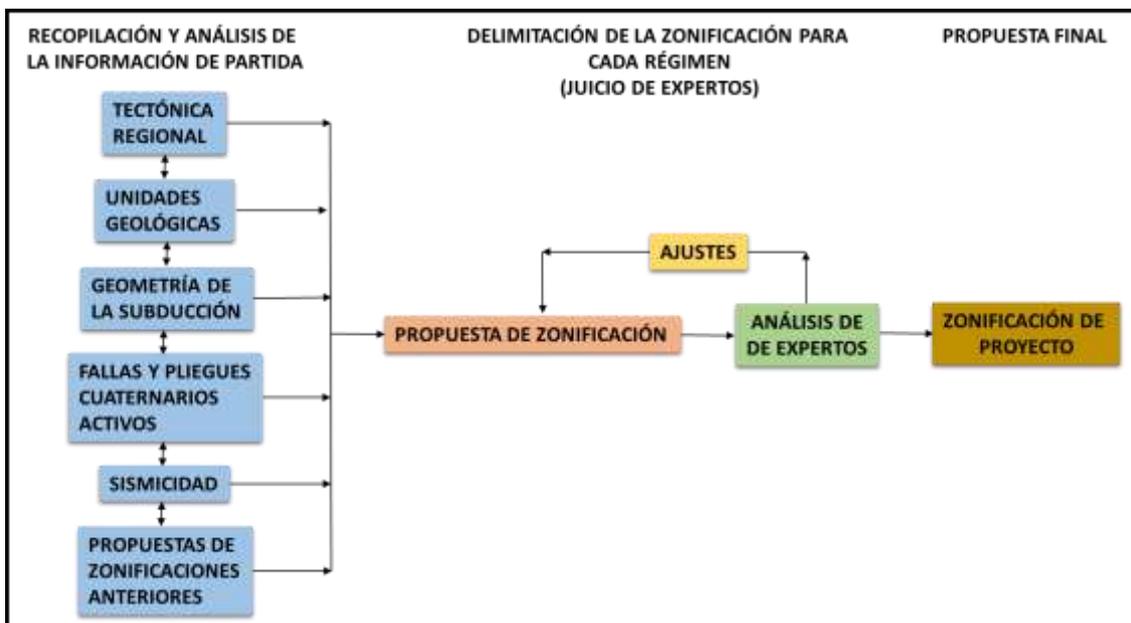
El año de referencia de 1963 para los registros sísmicos comprendidos en el intervalo de magnitud 4.5-6.0, coincide con el inicio de la distribución de información de eventos sísmicos recopilados en el mundo por parte de las redes sismológicas de agencias internacionales.

En el intervalo de magnitud 6.0-7.0, el análisis muestra un cambio de pendiente de la curva que representa el número de sismos acumulado a partir de 1910.

Para magnitudes mayores a 7.0, el análisis muestra el año de completitud en 1905 para el régimen de subducción, mientras que para el régimen cortical se marca un año de completitud anterior, 1793. La diferencia es debida a que se dispone de información más antigua para sismos corticales.

#### 4.3.2. PROPUESTA DE ZONAS SIMOGENÉTICAS PARA EL CÁLCULO DE LA PELIGROSIDAD SÍSMICA.

Uno de los objetivos de este estudio es la propuesta de una zonificación sismo genética para el cálculo de la peligrosidad sísmica en Ecuador, para lo cual se ha seguido el siguiente esquema de trabajo (Figura 4.12):

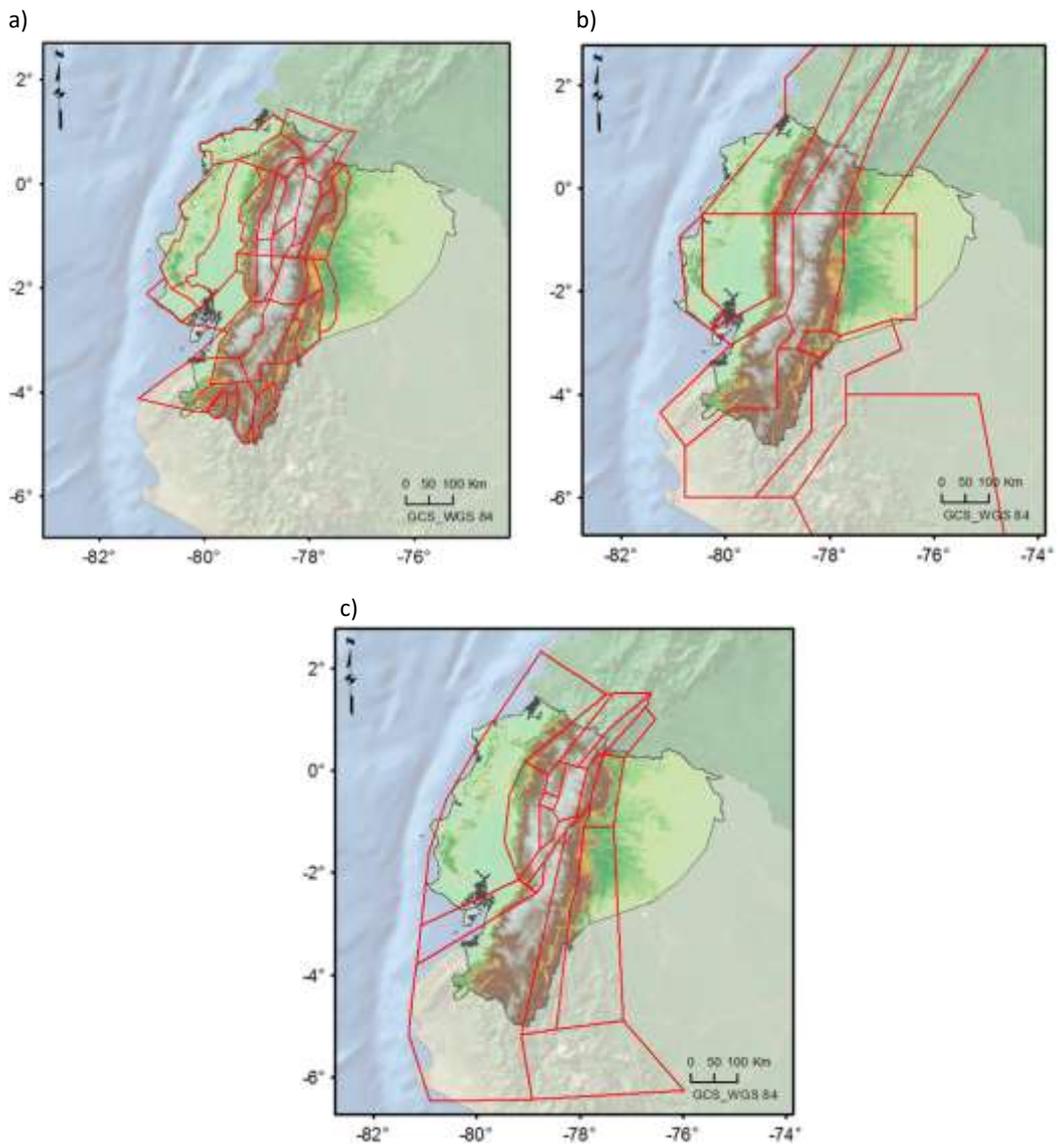


**Figura 4.12:** Esquema de trabajo para la propuesta de un modelo de zonas sismo genéticas para el cálculo de la peligrosidad sísmica.

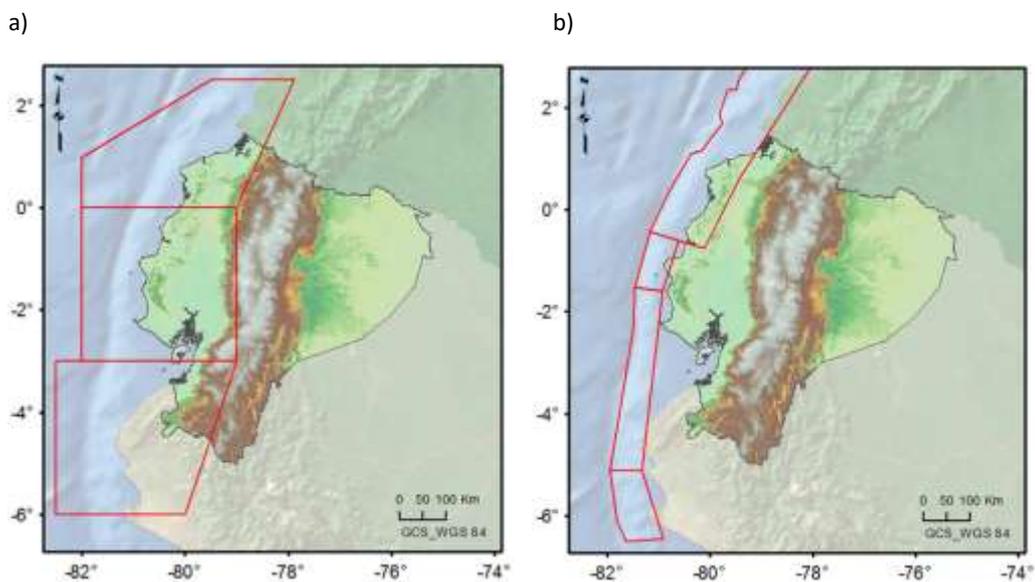
La primera fase del trabajo de propuesta de zonificación ha consistido en la recopilación y análisis de la siguiente información de partida:

- Tectónica regional: descrita en el apartado 3.2.
- Geología: se ha utilizado la información geológica en proceso de actualización proporcionada para este estudio por el Instituto Nacional de Investigación Geológico, Minero, Metalúrgico del Ecuador (INIGEMM) en marzo del 2014 y se ha complementado con el análisis de publicaciones recientes. Esta información ha sido descrita en el apartado 3.3.

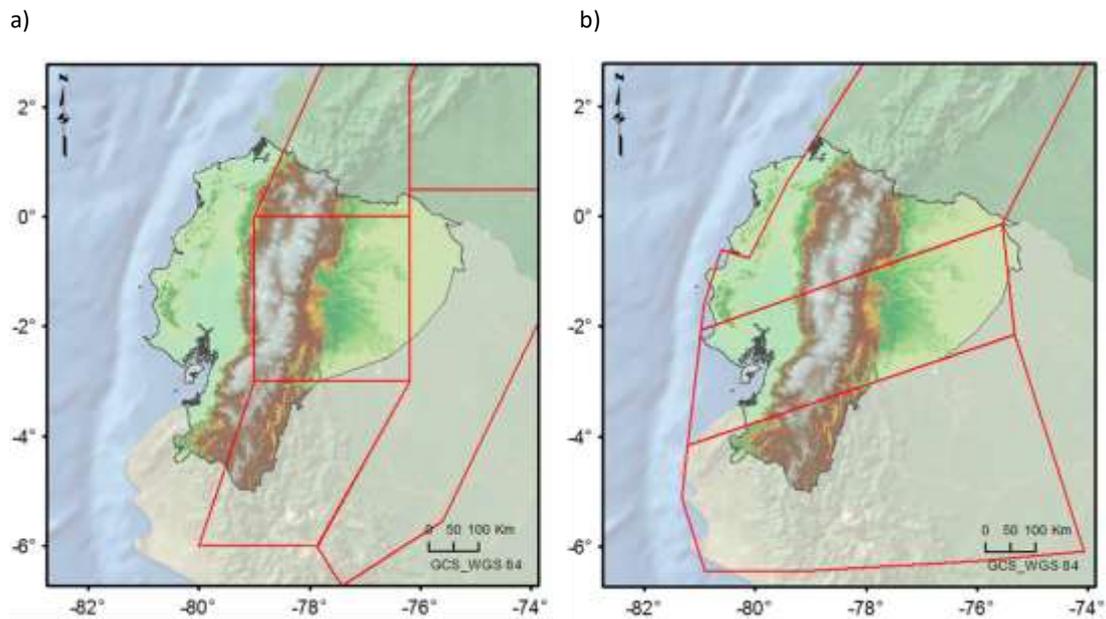
- Geometría de la subducción: ha integrado el análisis realizado en los apartados 3.2.4 y 4.3.2.2, junto con información del Catálogo Sísmico.
- Fallas y pliegues cuaternarios activos: se han considerado los trabajos realizados por Baize et al. (2014), que hacen un análisis de la falla Pallatanga y su segmentación; Alvarado et al. (2014) que realizan el análisis del sistema de fallas Quito y Chunga (2010), quien recopila información de fallas y pliegues publicados por diferentes autores. Estos trabajos complementan la información presentada en la base de datos gráfica y alfanumérica de fallas y pliegues cuaternarios para Ecuador, elaborada por Egüez et al. (2003).
- Sismicidad: mediante análisis de los datos del Catálogo Sísmico del presente estudio.
- Propuestas de zonificaciones anteriores: considerando trabajos realizados para la zona de estudio por:
  1. Chunga (2010), quien propone una zonificación sísmica para corteza en Ecuador a través de la integración de datos geológicos, sismológicos y morfoestructurales (Figura 4.13 a).
  2. Aguiar (2013, comunicación personal), que propone zonificaciones para los regímenes de corteza, subducción interfase y subducción in-slab (información proporcionada por comunicación personal) y corresponden a una actualización de su trabajo Aguiar et al. (2009) (Figuras 4.13 b, 4.14 a y 4.15 a).
  3. Alvarado (2012), que propone una caracterización e identificación de zonas sismogénicas para corteza y subducción considerando conjuntos de fallas con propiedades similares, además de información sísmica y geológica del sector (Figuras 4.13 c, 4.14 b y 4.15 b).



**Figura 4.13:** Propuestas de zonificaciones para régimen Cortical: a) Chunga (2010); b) Aguiar (2013); c) Alvarado (2012).



**Figura 4.14:** Propuestas de zonificaciones para subducción interfase: a) Aguiar (2013); b) Alvarado (2012).



**Figura 4.15:** Propuestas de zonificaciones para subducción intraplaca a) Aguiar (2013); b) Alvarado (2012).

Dada la importancia de la zonificación sismogénica en el resultado de la peligrosidad, en su planteamiento se han tratado de seguir criterios que no se basen exclusivamente en la distribución de la sismicidad o únicamente en la localización de dominios o estructuras geológicas.

Con esta premisa se ha integrado el conocimiento disponible sobre datos de diversa índole indicados en la Figura 4.12.

Con la finalidad de reunir el máximo consenso sobre los aspectos claves en la propuesta de una nueva zonificación, se ha seguido un procedimiento de juicio de expertos. Así, se han realizado reuniones de trabajo, tanto en Ecuador como en España, con miembros pertenecientes al Centro de Investigaciones Científicas de la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE-Ecuador, Instituto Oceanográfico de la Armada del Ecuador e Instituto Espacial Ecuatoriano, para finalmente realizar la integración del trabajo y el planteamiento final en el Grupo de Investigación de Ingeniería Sísmica de la Universidad Politécnica de Madrid.

Como resultado final del proceso, se han definido zonas sismogénicas para tres regímenes tectónicos: cortical, subducción interfase y subducción in-slab. Su descripción se presenta a continuación.

#### **4.3.2.1. Zonificación cortical.**

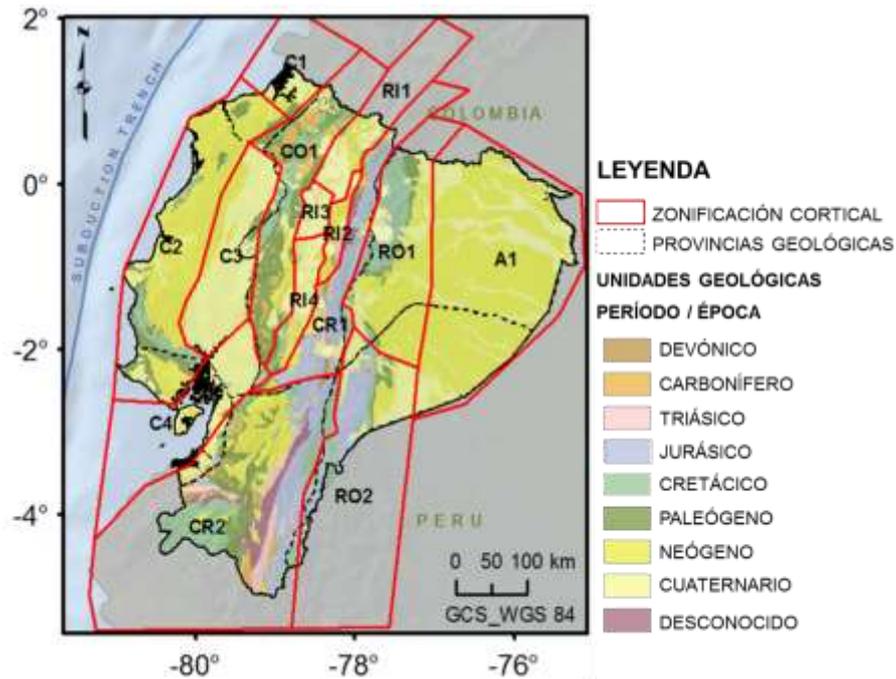
Para la definición de la zonificación cortical se ha buscado inicialmente dar continuidad a las estructuras geológicas de la región, considerando como referencia adicional el trabajo de Vera (2013), donde propone los límites de las provincias geológicas y territorios tectónicos, así como información de las características morfoestructurales presentes.

Simultáneamente se han realizado ajustes en base a los datos de fallamiento y pliegues cuaternarios e información de la sismicidad procedente del Catálogo Sísmico, buscando una definición de límites que permita que cada zona planteada tenga una distribución espacial homogénea de la sismicidad, con información suficiente para realizar un ajuste de dicha sismicidad a un modelo de recurrencia.

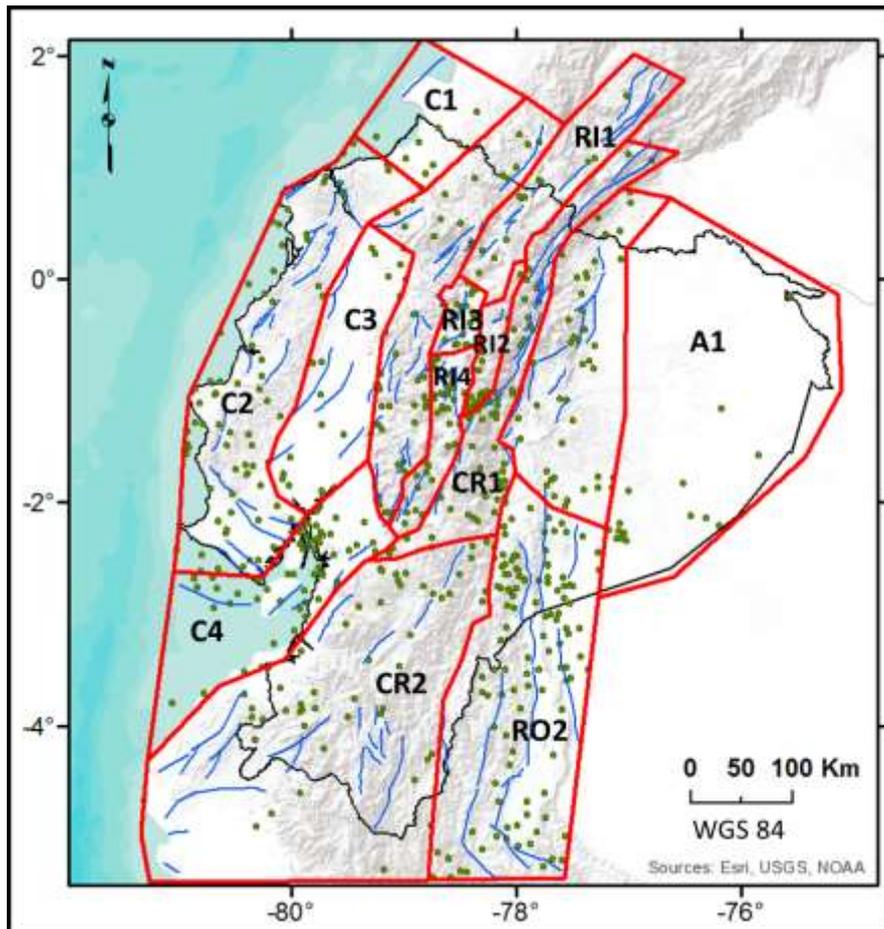
Las zonas corticales propuestas en este trabajo se muestran en la Figura 4.16. Dentro de este conjunto, en base a su ubicación en las regiones naturales del Ecuador, se realiza la siguiente agrupación:

1. Región Costa: en esta región se identifican 4 zonas nominadas con un número correlativo C1, C2, C3 y C4.
2. Cordillera de los Andes: en la Cordillera Occidental se ubica la zona CO1, mientras en la Cordillera Real se localizan las zonas CR1 al norte y CR2 al Sur.
3. Región Interandina: se encuentra cubierta de Norte a Sur por las zonas RI1, RI2, RI3 y RI4.
4. Región Oriental: las zonas RO1 y RO2 se localizan en las estribaciones orientales de la Cordillera Real (conocidas también como tercera cordillera), mientras la zona A1 cubre la región que conforma la cuenca alta del Amazonas.

a)



b)



**Figura 4.16:** Zonificación cortical propuesta para el cálculo de la peligrosidad sísmica en el presente estudio (Líneas rojas continuas). Las zonas definidas aparecen superpuestas a: a) Unidades Geológicas identificadas por Zamora y Litherland (1993) y Provincias Geológicas identificadas por Vera (2013) (trazo negro discontinuo). b) Modelo Digital de Elevación (30 m), fallas y pliegues cuaternarios (Egüez et al., 2003) y sismicidad superficial según el Catálogo Sísmico.

### **Zonas de la región costa.**

Esta región se encuentra localizada en la llanura costera que representa la zona de ante-arco, extendiéndose hacia el Este hasta las estribaciones occidentales de la Cordillera de los Andes.

Comprende el territorio tectónico denominado Corteza Oceánica Acretada Tardía y la provincia geológica denominada Plataforma Costera (Vera, 2013).

Debido a la deformación de la placa superior, se identifican áreas de fallamiento y sismicidad superficial activa hasta una profundidad menor o igual a 40 km (Chunga et al., 2009).

Se identifican cuatro zonas con las siguientes características (Figura 4.17):

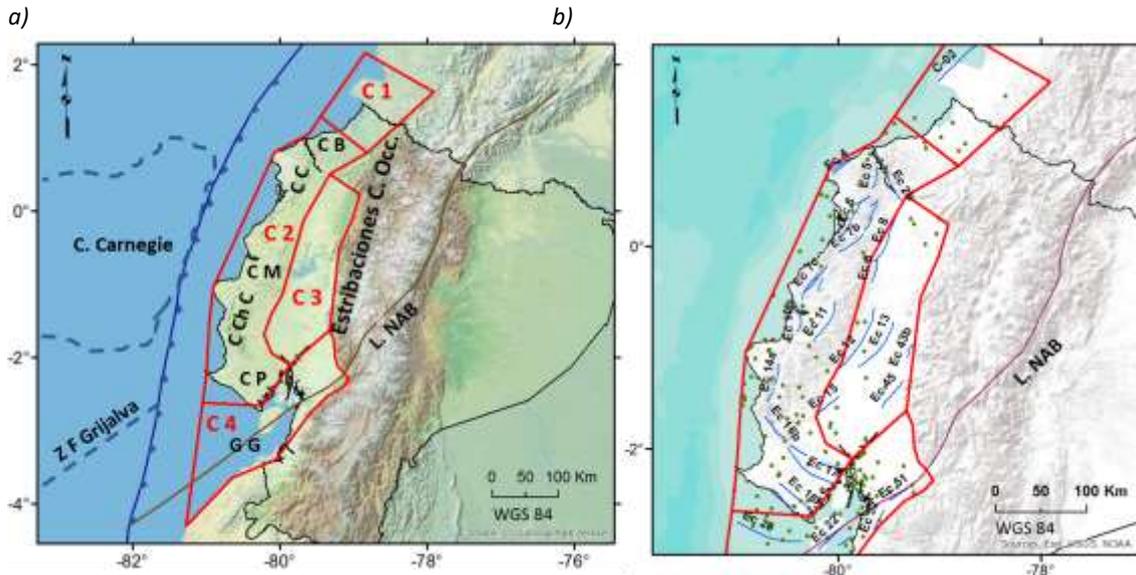
**Zona C1:** se encuentra ubicada en el límite fronterizo con Colombia, muestra sismicidad escasa y el máximo sismo registrado en la zona tiene una magnitud Mw 4.6.

**Zona C2:** ubicada frente al inicio de la subducción de la Cordillera de Carnegie, incluye colinas próximas a la línea de costa que conforman las cordilleras de Cojimés y de Chongón-Colonche, que se originarían como consecuencia de la subducción de la Cordillera de Carnegie (Egbue y Kellog, 2010). Entre las zonas de la Región Costa, esta zona es la que más sismicidad presenta, distribuida de manera homogénea, siendo el máximo sismo registrado de magnitud Mw 6.6. Los mayores eventos registrados ya en época instrumental se ubican cerca de la línea de costa.

**Zona C3:** constituida por corteza formada por la acreción ocasionada por la subducción, cuyo basamento estaría conformado por corteza marina del período Cretácico (Witt et al., 2006). Se extiende en dirección Este hasta una altura próxima a los 1200 m y su sismicidad se encuentra en un rango de magnitud Mw 4.0-4.8.

**Zona C4:** es una zona de importante actividad sísmica, donde se localiza el Golfo de Guayaquil, que constituye una zona de deformación del ante-arco ecuatoriano, cuya subsidencia se daría principalmente durante el Cuaternario. En ella se observan áreas de fallamiento de tipo normal de bajo ángulo y el límite Sur-Este del NAB (Goyes, 2009). El 82% de su sismicidad es registrada a partir de la década de 1990, siendo el mayor sismo registrado en la zona de magnitud 5.6.

Las zonas C1, C2 y C3 incluyen a las tres principales cuencas del ante arco ecuatoriano (Borbón, Manabí y El Progreso), cuya subsidencia se iniciaría con anterioridad a la del Golfo de Guayaquil (Witt et al., 2006).



**Figura 4.17:** Representación de la zonificación ubicada en la Región Costa, graficada sobre una imagen de relieve, donde se distingue: a) Representación de los límites de las zonas y las características físicas y tectónicas dominantes. b) Representación de los límites de la zonificación, fallas y pliegues cuaternarios (tomados de Egüez et al., 2003), sismicidad y límite del NAB (tomado de Alvarado, 2012).

Notación: C. Carnegie, Cordillera de Carnegie; Z F Grijalva, Zona de Fractura Grijalva; CB, Cuenca de Borbón; CC, Cordillera de Cojimíes; CM, cuenca de Manabí; C Ch C, Cordillera de Chongón Colonche; CP, Cuenca del Progreso; GG, Golfo de Guayaquil; Estribaciones C Occ, Estribaciones de la Cordillera Occidental; L. NAB, Límite del Bloque Norandino.

#### Zonas en la Cordillera de los Andes:

La Cordillera de los Andes se encuentra localizada en la región montañosa que constituye la estructura dominante en el territorio continental, cuyo levantamiento y distribución geológica serían la consecuencia de acreciones sucesivas, existiendo vestigios de corteza oceánica (Vera, 2013).

Comprende las provincias geológicas de los Andes Norte y Sur y el territorio tectónico denominado Complejo de Corteza Continental-Marina (Vera, 2013). En esta región se localiza la zona del arco volcánico, donde se observan sistemas de fallamiento activo, alcanzando la corteza un espesor de hasta 75 km de profundidad (Guillier et al., 2001).

En las cordilleras Occidental y Oriental, se identifican tres zonas sismogenéticas con las siguientes características (Figura 4.18):

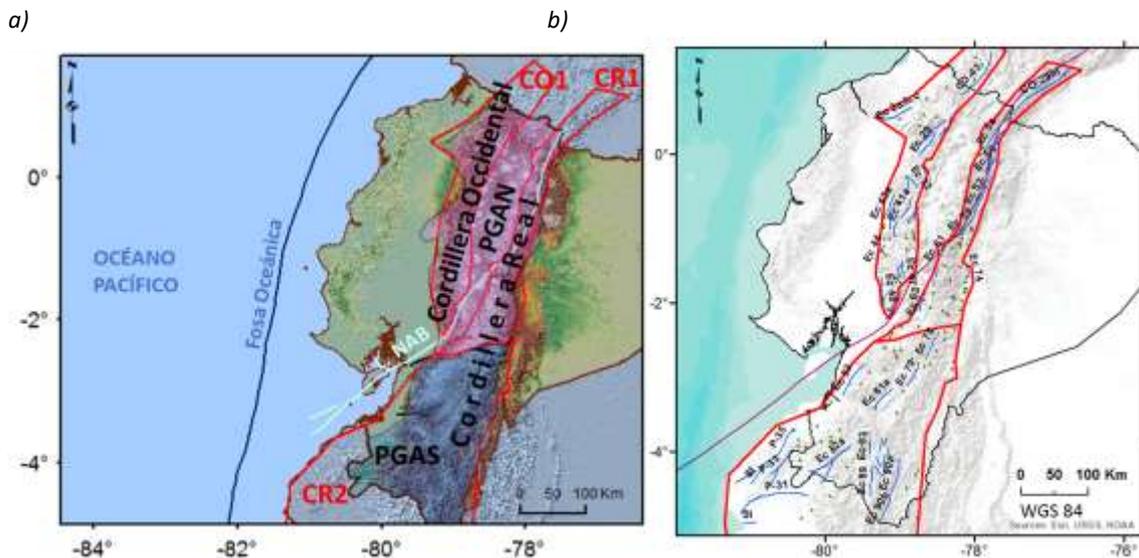
**Zona CO1:** ubicada en la Cordillera Occidental, su límite Sur se encuentra en las proximidades al Golfo de Guayaquil. Forma parte del territorio tectónico Corteza Oceánica Acretada Tardía y la provincia geológica de los Andes Norte (Vera, 2013). Está conformada principalmente por terrazas oceánicas acretadas, el Arco Insular Macuchi y volcanes activos Plioceno-Cuaternarios (Vera, 2013; Egüez et al., 2003; Guillier et al., 2001). Aquí se localizan fallas inversas distribuidas a lo largo de la zona, con un terremoto histórico de magnitud 6.4, aunque la magnitud máxima que se podría alcanzar por estimación geológica, como consecuencia de posibles rupturas de las fallas (aplicando las relaciones propuestas por Stirling et al., 2002) sería de Mw 7.2.

**Zonas CR1, y CR2:** localizadas en la Cordillera Oriental o Real, que es más antigua y más alta que la Cordillera Occidental, conformada principalmente por rocas antiguas que posiblemente

se habrían acretado en dirección Este-Oeste, ocasionando que cada nuevo terreno haya ido deformando y cubriendo a los anteriores (Vera, 2013).

**Zona CR1:** se encuentra ubicada en la Provincia Geológica de los Andes Norte, corresponde a la zona más alta de la Cordillera Real, donde se observan estructuras volcánicas cuaternarias activas. Aquí se localizan sistemas de fallas que acomodarían el movimiento del NAB hacia el Noreste (Egüez et al., 2003; Trenkamp et al., 2002), lo que posiblemente sea la causa de que en esta zona se localice la mayor cantidad de sismos entre las zonas de cordillera, en un rango de magnitud Mw de 4.0-7.4, identificándose además tres terremotos históricos de magnitudes Mw 6.1, 6.2 y 7.4.

**Zona CR2:** se extiende desde el Cruce Cañar hacia el Sur. A diferencia de la zona CR1 comprende a la Provincia Geológica de los Andes Sur, que corresponde a la parte más baja de la Cordillera Real, donde se verifica la existencia de planicies elevadas y ausencia de estructuras volcánicas cuaternarias (Vera, 2013; Guillier et al., 2001). Muestra abundante sismicidad, aunque su distribución no es completamente homogénea. Su máximo terremoto alcanza una magnitud Mw de 5.1 y el inicio de sus registros sísmicos corresponde a la década de 1960.



**Figura 4.18:** Representación de la zonificación ubicada en la Cordillera de los Andes, donde se distingue: a) Representación de los límites de las zonas junto a las Provincias Geológicas según Vera (2013), graficadas sobre un MDT de 30m. b) Representación de los límites de las zonas, fallas y pliegues cuaternarios (tomado de Egüez et al., 2003), sismicidad a partir del Catálogo Sísmico y límite del NAB (tomado de Alvarado, 2012), graficados sobre una imagen de relieve.

Notación: PGAN, Provincia Geológica de los Andes Norte; PGAS, Provincia Geológica de los Andes Sur; L. NAB, límite del Bloque Norandino.

### Zonas en la región interandina.

Localizadas en el valle interandino, con una elevación comprendida entre 2200 y 3000 m, esta región está constituida por depresiones geomorfológicas ubicadas entre cadenas montañosas en forma de escalera que unen secuencialmente a las cordilleras Occidental y Oriental. Se sugiere que el movimiento del NAB fue uno de los factores influyentes en su formación y desarrollo (Witt et al., 2006).

Comprenden la provincia geológica de los Andes Norte y el territorio tectónico denominado Complejo de Corteza Continental-Marina, formado por cinturones continentales y lozas oceánicas acretadas (Vera, 2013).

Su composición se caracteriza por la presencia de sedimentos detríticos y volcano-detríticos que serían el producto de erosiones y erupciones volcánicas (IGM, 2013; Egüez et al., 2003). En ésta región se sugiere un espesor de la corteza de hasta 75 km de profundidad (Guillier et al., 2001).

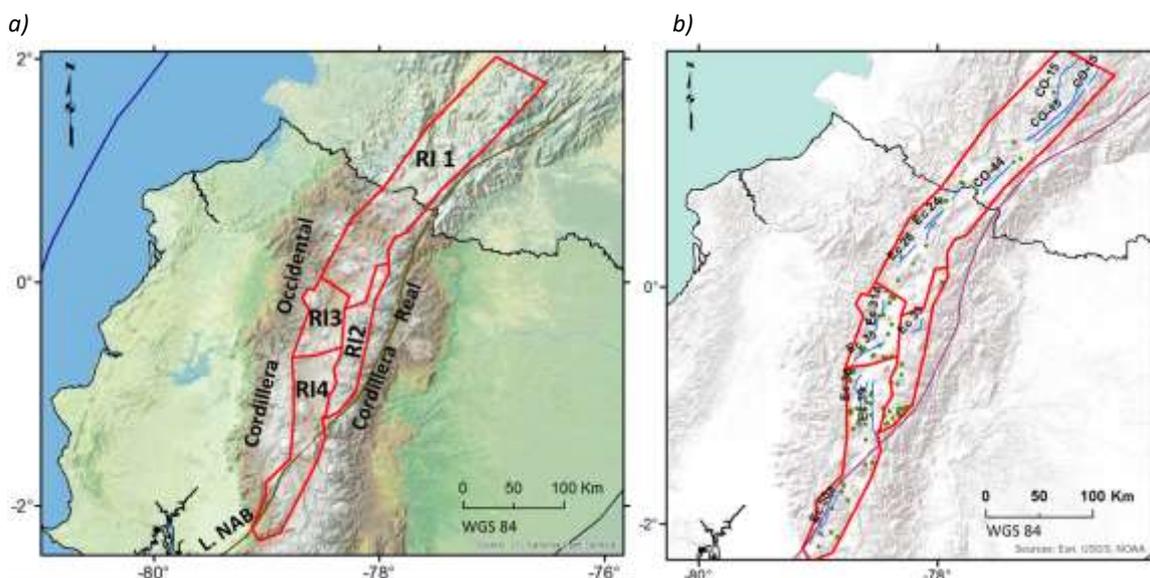
Se identifican cuatro zonas, con las siguientes características (Figura 4.19):

**Zona RI1:** ubicada al Norte, en el límite de la frontera Ecuador-Colombia, donde se localizan fallas que podrían generar terremotos estimados con criterio geológico (como consecuencia de ruptura de fallas) en el rango de magnitud Mw 6.5-7.1. Muestra escasa sismicidad, con una distribución poco homogénea, aunque aquí se ubican dos terremotos históricos con magnitudes Mw de 7.3 y 6.4.

**Zona RI2:** localizada al Este de las zonas sismogénicas interandinas, donde se ubica una única falla que podría generar un sismo (estimado con criterio geológico como consecuencia de su ruptura) de magnitud Mw 6.6. Posee escasa sismicidad distribuida de manera heterogénea en un rango de magnitud Mw de 4.0-5.0. Sus registros sísmicos inician a partir de 1967.

**Zona RI3:** Localizada en el centro de la región interandina, donde se localiza el sistema de fallas Quito que cruza el parque inmobiliario de la capital del Ecuador y que pueden generar terremotos en un rango de magnitud de Mw 5.7-6.4 (Alvarado et al., 2014). La distribución de su sismicidad se muestra de manera homogénea, donde se ubican cuatro terremotos históricos en un rango de magnitud Mw de 5.8-6.4.

**Zona RI4:** Localizada al Sur de la región interandina, donde se ubica el sistema de fallas Pallatanga que acomodaría el movimiento del Bloque Norandino. Es en éste sector donde se han localizado seis terremotos históricos de considerable magnitud (Mw 5.8-7.6).



**Figura 4.19:** Representación de la zonificación ubicada en la Región Interandina, donde se distingue: a) Representación de los límites de las zonas, graficadas sobre un MDT de 30m. b) Representación de los límites de la zonificación, fallas y pliegues cuaternarios (tomados de Egüez et al., 2003), sismicidad a partir del Catálogo Sísmico y límite del NAB (tomado de Alvarado, 2012), graficados sobre una imagen de relieve. Notación: L. NAB, límite del Bloque Norandino.

### **Zonas en la región oriental.**

Esta región representa la zona de *back-arc*, que se extiende desde el pie de la vertiente oriental de la Cordillera de los Andes hacia el Este, formando la cuenca alta del Amazonas.

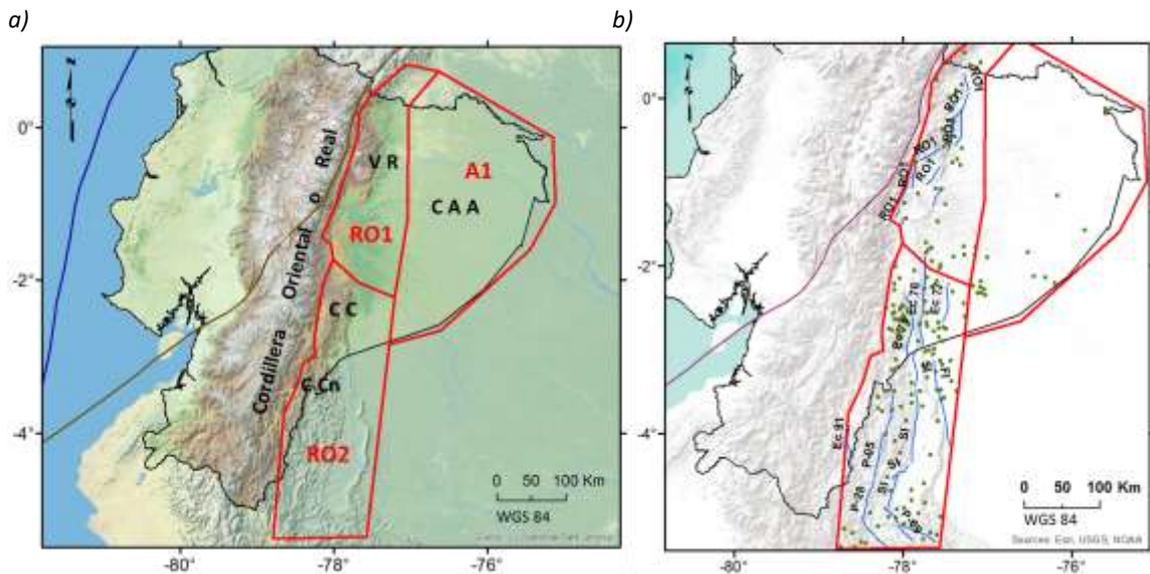
Aquí se localiza el territorio tectónico denominado Corteza Continental y las provincias geológicas Oriente Norte y Oriente Sur. Se encuentra constituida principalmente por rocas sedimentarias (Vera, 2013; Egúez et al., 2003).

Se diferencian tres zonas con las siguientes características (Figura 4.20):

**Zona RO1:** ubicada en la provincia geológica denominada Cuenca del Oriente Norte, que está constituida principalmente por corteza continental (Vera, 2013), donde se localiza un ramal de los Andes (conocida también como una tercera cordillera), que se encuentra conformado por volcanes andesíticos, siendo el volcán Reventador el más antiguo y activo de éste sector. Aquí se muestran sistemas de fallas situados principalmente en las estribaciones orientales de la Cordillera de los Andes. Su sismicidad se encuentra distribuida de manera bastante homogénea, en un rango de magnitud Mw de 4.0-5.4, con registros sísmicos desde 1964.

**Zona RO2:** ubicada en la provincia geológica denominada Cuenca del Oriente Sur (Vera, 2013), que conforma la parte más elevada de la cuenca del Río Marañón, donde se localizan además las cordilleras del Cutucú y del Cóndor. En su interior se observan importantes pliegues, cercanos y en dirección paralela a la Cordillera Real. Aunque es la zona que contiene la mayor cantidad de eventos sísmicos entre todas las zonas de corteza, su distribución no es completamente homogénea, ya que en su parte norte se aprecia una mayor concentración de los mismos. La mayor parte de los sismos se registran a partir de la década de 1960, siendo los terremotos de magnitud Mw 7.0 y 6.9 los más grandes ocurridos en la zona, ya en época instrumental.

**Zona A1:** forma parte de la cuenca alta del río Amazonas y cubre la región de menor elevación del oriente ecuatoriano. Las rocas Precámbricas y Paleozoicas son la base de estos territorios (Vera, 2013). Hasta el momento no se han realizado estudios que permitan identificar las fallas presentes en esta zona, siendo la sismicidad distribuida de manera heterogénea hasta una magnitud máxima Mw de 4.8.



**Figura 4.20:** Representación de la zonificación ubicada en la Región Oriental, graficada sobre una imagen de relieve, donde se distingue: a) Representación de los límites de las zonas y las principales características morfoestructurales, b) Representación de los límites de las zonas, fallas y pliegues cuaternarios (tomado de Egüez et al., 2003) y sismicidad del Catálogo Sísmico.

Notación: VR, Volcán Reventador; CC, Cordillera del Cutucú; C Cn, Cordillera del Cóndor; CAA, cuenca alta del Amazonas.

#### 4.3.2.2. Planteamiento de la geometría de la subducción.

A partir de los análisis de las características tectónicas descritas en el apartado 3.2 y de la delimitación de las fuentes de actividad sísmica descrita en el apartado 4.2, se ha incorporado la información del Catálogo Sísmico, atendiendo a la ubicación geográfica y profundidad hipocentral de los eventos, con el objetivo de plantear un modelo de subducción con dos fuentes diferenciadas:

- a) Subducción Interfase.
- b) Subducción Profunda (In-slab).

Numerosos estudios evidencian las características diferenciables de ambas zonas, que se detallan a continuación.

##### Subducción Interfase.

Las estimaciones realizadas por diferentes autores permiten apreciar variabilidad en el ángulo de subducción de la placa oceánica, siendo esta más superficial desde el Golfo de Guayaquil hacia el Sur y más pronunciada desde el Golfo de Guayaquil hacia el Norte (Figura 4.21).

Un primer análisis ha permitido diferenciar tres regiones en la zona de estudio próxima a la fosa de subducción:

- **Región sur:** se extiende desde el Golfo de Guayaquil hacia el Sur. En ésta región se plantea un ángulo de buzamiento en dirección Este de la placa oceánica, en el rango de 4°-5°, hasta una profundidad de 40 a 70 km Chunga et al. (2009). El análisis de la geometría de la zona de subducción propuesto por Hayes et al. (2012), para esta misma región, permite estimar un ángulo aproximado de inclinación del techo de la placa oceánica de 13°.

considerando la curva de nivel ubicada a una profundidad de 40km y su distancia hasta la fosa.

- **Región centro:** se extiende desde el Golfo de Guayaquil hasta la Península de Esmeraldas. Bajo esta región subduce la cordillera submarina de Carnegie, observándose, además, una menor profundidad de la fosa de subducción.

En latitud 0°, Trenkamp et al. (2002) proponen un buzamiento de la placa oceánica en dirección Este en el intervalo de 6° a 17°, mientras Manchuel et al. (2009) plantean una inclinación del slab con un ángulo de 10°, entre la Península de Manabí y la frontera con Colombia. Hayes et al. (2012), considerando la curva de nivel a una profundidad de 40 km y su distancia hasta la fosa, estiman un ángulo aproximado de 19°.

- **Región norte:** se extiende desde la Península de Esmeraldas hacia el Norte. En éste sector el eje de la fosa de subducción cambia de una dirección N10°E, hasta una orientación N38°E (Chunga et al., 2009; Zamora y Litherland, 1993). La fosa llega a alcanzar una profundidad de 3900 m frente a la provincia de Esmeraldas (Goyes, 2009; Collot et al., 2009).

Chunga et al. (2009) plantean que la inmersión del plano de Benioff muestra un ángulo de 4° a 5°, mientras Manchuel et al. (2009) proponen una inclinación del slab con un ángulo de 10° frente a la provincia de Esmeraldas. Hayes et al. (2012) estiman un ángulo de inclinación del techo de la placa oceánica de 16° a una profundidad de 40km

### **Subducción profunda (in-slab).**

El análisis de la sismicidad a diferentes niveles de profundidad y la progresión de la subducción de la placa oceánica y la cordillera de Carnegie, ha permitido diferenciar un menor ángulo de inclinación del techo de la placa oceánica al Sur de la región de estudio y un mayor ángulo al Norte (Figura 4.21).

Para el análisis de la subducción profunda se ha dividido el área de interés en dos regiones:

- **Región sur:** se extiende desde el Golfo de Guayaquil hacia el Sur. Es la región donde se presenta la subducción de una corteza oceánica más profunda, localizada al Sur de la zona de fractura Grijalva (Pedoja et al., 2009; Collot et al., 2009; Goyes, 2009; Egüez et al., 2003; Gutscher et al., 1999).

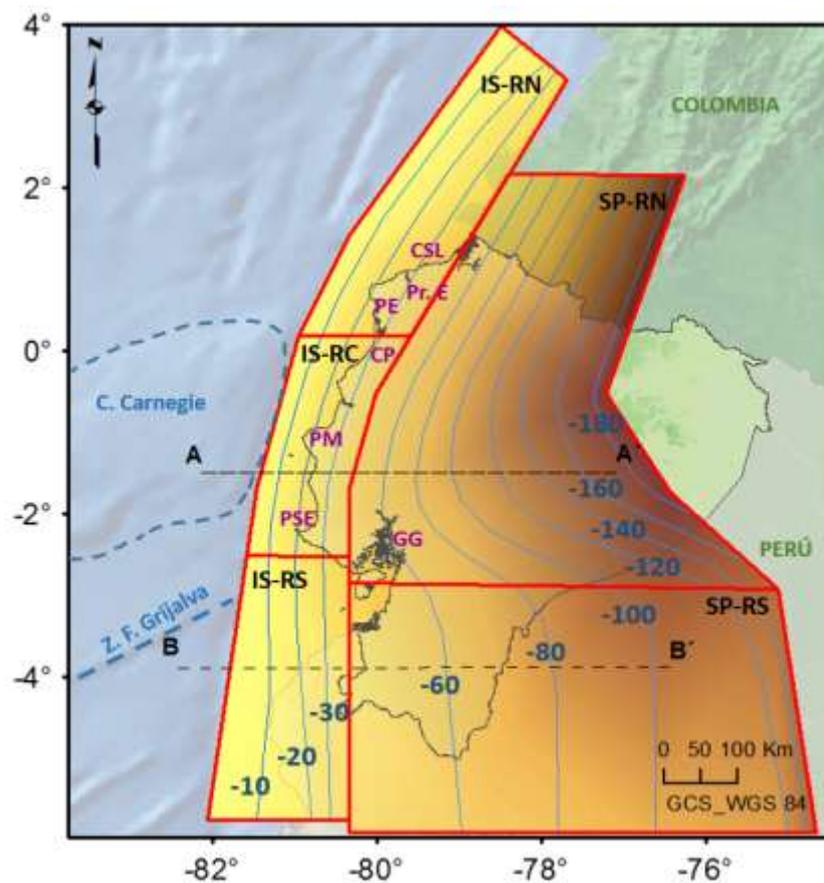
Chunga et al. (2009) proponen un ángulo de inclinación del slab de 17° desde la Punta de Santa Elena hacia el Sur, mientras el análisis de la geometría de la zona de subducción realizado por Hayes et al. (2012), considerando la curva de nivel ubicada a una profundidad de 40 km y su distancia horizontal hasta la curva de nivel a profundidad de 120 km, permite estimar un ángulo de inclinación aproximado de 8°.

- **Región norte:** se extiende desde el Golfo de Guayaquil hacia el Norte. El ángulo de buzamiento en dirección Este de la placa de Nazca podría estar influenciado por la presencia de la Cordillera de Carnegie (Goyes, 2009; Collot et al., 2009; Trenkamp et al., 2002).

Guillier et al. (2001) plantean un ángulo de inclinación del slab en un rango de 25°-30° hasta una profundidad 200 km. Manchuel et al. (2009) proponen un ángulo de 25°-30°,

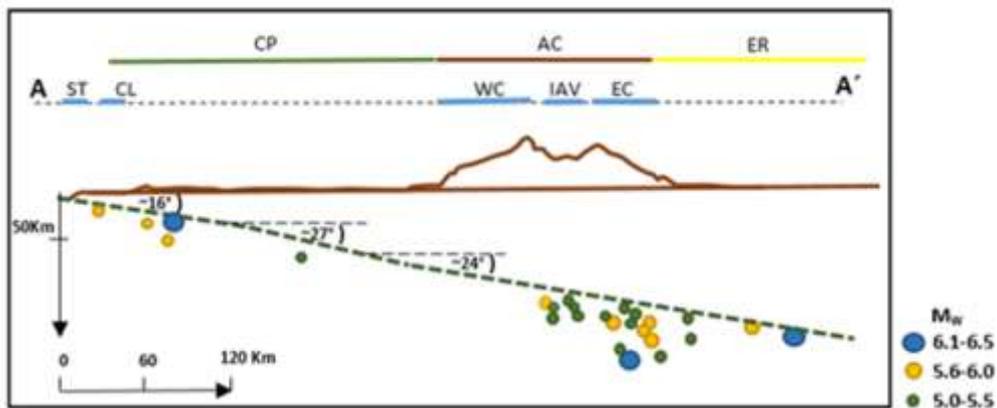
extendiéndose hasta 300-400 km al Este de la trinchera y Chunga et al. (2009) plantean que la inmersión del plano de Benioff se desarrolla con un ángulo en ésta región de 28°. Hayes et al. (2012) sitúan el límite de la subducción, a una distancia de 340 km al Este de la fosa, a las siguientes profundidades: 120 km, 150 km y 140 km para latitudes de 2° 8', 1° 0', 0° 45', respectivamente. Ello confirmaría la variabilidad del ángulo de inclinación del techo de la placa oceánica.

Integrando el conjunto de datos derivados de las referencias anteriores, se ha hecho una propuesta de la geometría de la subducción (Figuras 4.21), mostrando la inclinación del techo de la placa oceánica mediante curvas de nivel en profundidad, consecuente con las características tectónicas y sísmicas de la región de estudio (Figuras 4.22-4.23).



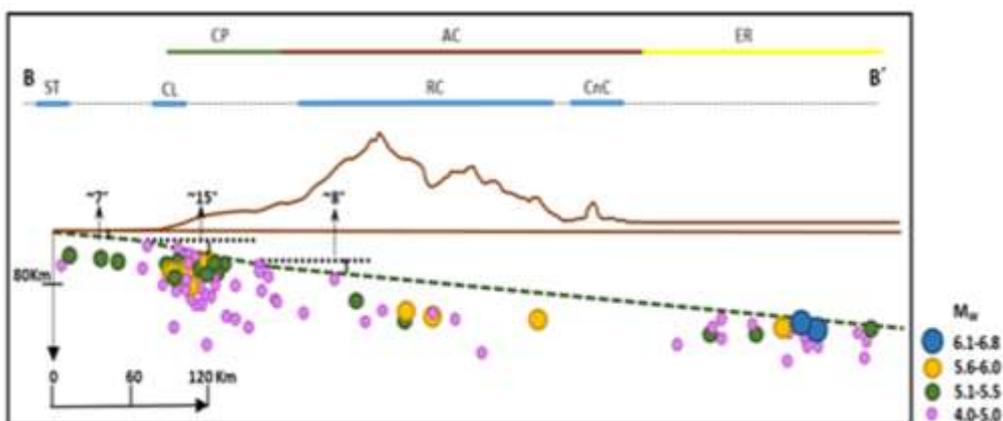
**Figura 4.21:** Representación de la geometría de la zona de subducción propuesta en el presente estudio mediante el uso de curvas de nivel en profundidad (unidades en km). Se representan además dos perfiles para el análisis de la sismicidad a lo largo de los mismos en las figuras posteriores: AA', corte transversal a -1° 45'; BB', corte transversal a -3° 55'.

Notación: IS-RN, Subducción Interfase-Región Norte; IS-RC, Subducción Interfase-Región Centro; IS-RS, Subducción Interfase-Región Sur; SP-RN, Subducción Profunda-Región Norte; SP-RS, Subducción Profunda-Región Sur; CSL, Cabo San Lorenzo; Pr. E, Provincia de Esmeraldas; PE, Península de Esmeraldas; CP, Cabo Pasado; PM, Península de Manabí; PSE, Península de Santa Elena; GG, Golfo de Guayaquil; AA', corte transversal a -1° 45'; BB', corte transversal a -3° 55'.



**Figura 4.22:** Representación de la sismicidad del corte transversal AA' ubicado en la Figura 4.21 a una latitud de  $-1^{\circ} 45'$ .

Notación: CP, plano de costa; AC, Cordillera de los Andes; ER, Región Oriental; ST, trinchera de subducción; CL, línea de costa; WC, Cordillera Occidental; IAV, Valle Inter Andino; EC, Cordillera Oriental o Real. (Coordenadas verticales exageradas del perfil topográfico).



**Figura 4.23:** Representación de la sismicidad del corte transversal BB' ubicado en la Figura 4.21 a una latitud de  $-3^{\circ} 55'$ .

Notación: CP, plano de costa; AC, Cordillera de los Andes; ER, Región Oriental; ST, trinchera de subducción; CL, línea de costa; RC, Cordillera Real; CnC, Cordillera del Cóndor. (Coordenadas verticales exageradas del perfil topográfico).

#### 4.3.2.3. Zonificación de la subducción.

Para modelizar la subducción se han propuesto dos tipos de zonificaciones: una denominada de interfase, cercana a la trinchera y donde comienza la subducción, y otra denominada in-slab que corresponde a la subducción más profunda.

##### Zonificación Interfase.

Se ha propuesto un inicio de subducción de baja pendiente, que sería la causa de acumulación de tensión y generación de sismicidad hasta una profundidad de 40 a 50 km (Chunga et al., 2009; Marcaillou et al., 2009). Atendiendo al análisis realizado anteriormente, se han planteado tres zonas de interfase con las siguientes características (Figura 4.24):

**Zona Interfase Sur (IFS):** se extiende desde el Golfo de Guayaquil hacia el Sur. Es en esta zona donde inicia la subducción de una placa oceánica más antigua y más profunda, limitada al Norte por el Escarpe de Grijalva, cuya inmersión presentaría una pendiente de bajo ángulo,

aproximadamente 7°. Su sismicidad muestra una distribución homogénea en un rango de magnitud Mw de 4.0-7.5.

**Zona Interfase Centro (IFC):** se extiende desde el Golfo de Guayaquil hasta las proximidades de la Península de Esmeraldas. El comienzo de la subducción en esta zona se identifica con la presencia de la cordillera submarina de Carnegie, observándose una mayor inclinación en la inmersión de la placa oceánica (aproximadamente 16°). Su sismicidad se distribuye de manera homogénea en toda la zona, existiendo registros sísmicos a partir de 1901, aunque el 96% de ellos son reportados a partir de la década de 1960.

**Zona de Interfase Norte (IFN):** ubicada desde las proximidades de la Península de Esmeraldas hacia el Norte, se extiende desde la trinchera hasta una distancia aproximada de 120 km al Este de la Fosa. A pesar de que en esta zona se ubican la mayor parte de los sismos de interfase, su distribución es heterogénea, observándose una mayor concentración al centro y norte de la misma. Es aquí donde se ubican los sismos más grandes de la región de estudio, con magnitudes Mw de 8.8 y 8.1 registradas en 1906 y 1979 y focos localizados entre la línea de costa y la fosa de subducción.

#### **Zonificación In-Slab.**

Se ha propuesto una subducción en profundidad, que comenzaría en el límite Este de la zonificación de interfase y se extendería hasta más allá del Este de la Cordillera de los Andes. Atendiendo al análisis realizado anteriormente se han planteado cuatro zonas in-slab, que responden a las siguientes características (Figura 4.24):

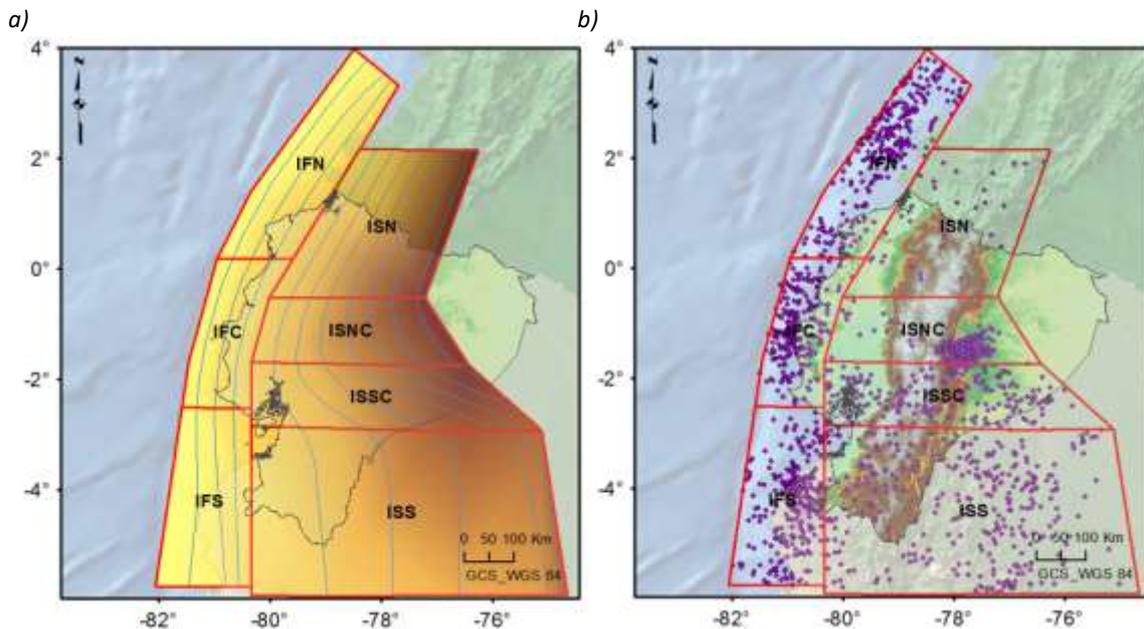
**Zona In-slab Sur (ISS):** muestra una pendiente de subducción más plana que el resto de zonas in-slab, extendiéndose bajo la provincia geológica de los Andes Sur. Presenta la mayor sismicidad de todas las zonas de subducción, distribuida homogéneamente en toda su área. El sismo de mayor tamaño registrado en esta zona corresponde a una magnitud Mw 7.5 con una profundidad estimada de 130 km.

**Zona In-Slab Sur Centro (ISSC):** localizada al Norte de la zona anterior, pero con un ángulo de buzamiento mayor. Aunque la cantidad de sismos ubicados en esta zona es menor que en la zona ISS, se localizan siete sismos en un rango de magnitud Mw de 6.0-7.5, a una profundidad  $\geq 130$  km, cuatro de ellos registrados instrumentalmente entre 1906-1943. La distribución de sismicidad es bastante homogénea.

**In-Slab Norte Centro (ISNC):** localizada frente al inicio de la subducción de la cordillera de Carnegie, alcanza mayores profundidades que el resto de zonas in-slab a menor distancia de la fosa. Sobre ésta zona se ubica la Cordillera de los Andes, donde se observa la presencia de estructuras volcánicas plio-cuaternarias que han presentado erupciones durante los últimos 10.000 años. Presenta una menor sismicidad que las anteriores, que se distribuye de manera heterogénea, observándose una mayor concentración de sismicidad en su parte Sur. El 99% de sus eventos han sido registrados a partir de la década de 1960, en un rango de magnitud Mw de 4.0-6.5.

**Zona In-Slab Norte (ISN):** se extiende bajo el centro norte de la Cordillera de los Andes, en su área correspondiente al sector ecuatoriano, en cuyas cumbres, al igual que en la zona anterior (ISNC), se observa la presencia de volcanismo activo cuaternario. En comparación con las zonas ISSC e ISS, esta zona alcanza mayores profundidades a menores distancias de la fosa de subducción. Presenta una menor sismicidad que el resto de zonas in-slab, pero su distribución

es bastante homogénea. El 93% de sus sismos son registrados a partir de la década de 1960, en un rango de magnitud  $M_w$  de 4.0-7.2.



**Figura 4.24:** Representación de las zonas sismogénicas de subducción, graficadas sobre una imagen de relieve, donde se distingue: a) Límites de las zonas y curvas de nivel en profundidad que representan la profundidad del techo de la placa oceánica. b) Límites de las zonas y sismicidad asociada a la subducción. Notación: IFN, Interfase Norte; IFC, Interfase Centro; IFS, Interfase Sur; ISN, In-slab Norte; ISNC, In-slab Norte Centro; ISSC, In-slab Sur Centro; ISS, In-slab Sur.

### 4.3.3. ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE SISMICIDAD.

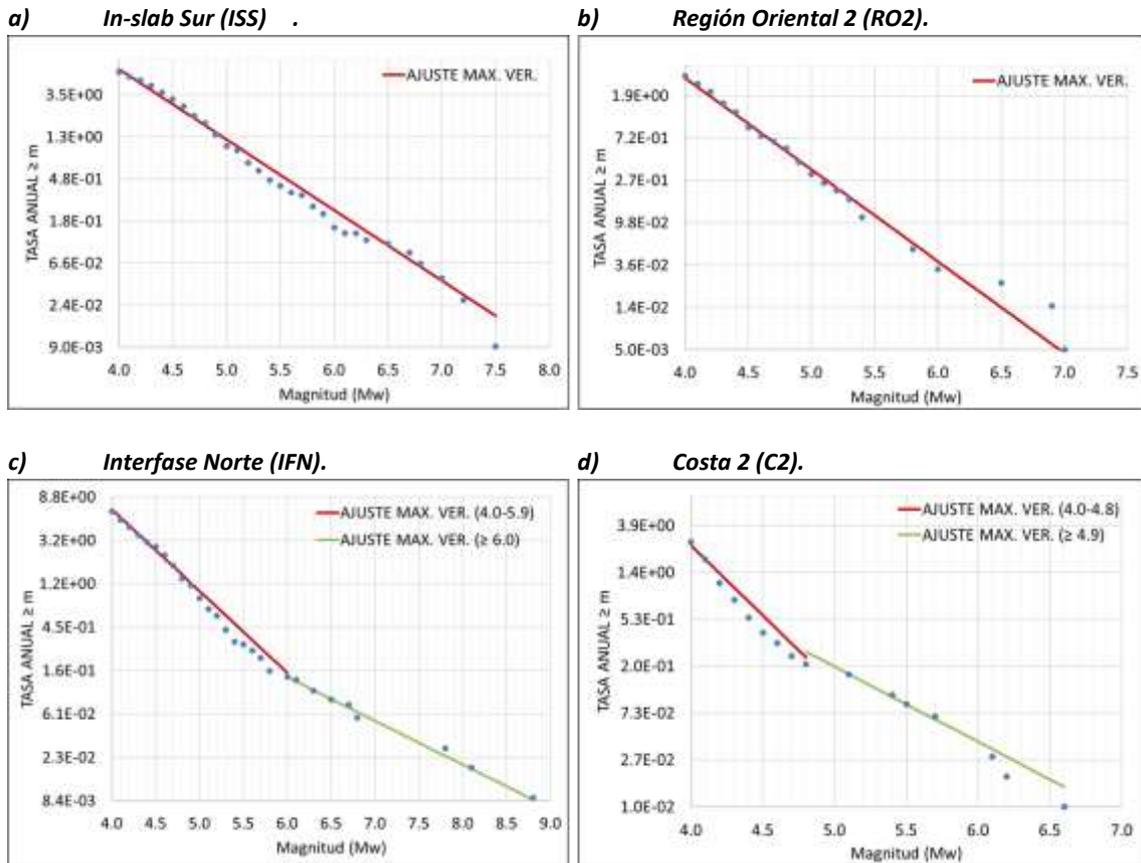
De acuerdo al método adoptado para el cálculo de la peligrosidad, se asume que en cada zona la sismicidad es equiprobable en toda su área. Ello implica que los eventos sísmicos dentro de cada zona son sucesos aleatorios independientes, cuyos tamaños están asociados con sus frecuencias mediante una ley logarítmica, acotada a una magnitud mínima y una magnitud máxima y con una tasa de actividad sísmica constante en el tiempo. La parte metodológica de esta fase de cálculo fue descrita en el apartado 2.1.4.2.

Así, para caracterizar la sismicidad de cada zona, el primer paso adoptado en el proceso ha consistido en agrupar los eventos sísmicos de acuerdo a su pertenencia a cada zona, para lo cual se ha utilizado el Catálogo Sísmico homogenizado a magnitud  $M_w$  y depurado de réplicas y premonitores. Dicho de otra forma, se ha explotado el catálogo sísmico por zonas, cuyas características de sismicidad han sido descritas en el apartado anterior (4.3.2).

La sismicidad de cada zona se ha ajustado a un modelo de Gutenberg-Richter, según la expresión  $\ln N = \alpha - \beta (m)$ , truncado a una magnitud mínima  $m_0$  de 4.0 ( $M_w$ ). El ajuste de la recta de Gutenberg-Richter para obtener los parámetros de sismicidad se ha realizado mediante el método de máxima verosimilitud, utilizando la propuesta publicada por Weichert (1980), que permite tener en cuenta diferentes períodos de completitud dependiendo de la magnitud, llegando a obtener una aproximación del parámetro  $\beta$ , de su incertidumbre y de la tasa de eventos de una magnitud  $\geq m_0$ :

De las estimaciones realizadas, se ha observado un claro cambio de pendiente en las zonas de Interfase Norte, (IFN) Interfase Centro, (IFC), Costa 2 (C2) y Costa 4 (C4), donde se observa una

pendiente menor para sismos grandes. En la Tabla 4.7 se muestran las magnitudes a partir de las cuales la pendiente de las correspondientes rectas es menor. Algunos ejemplos de los mencionados ajustes encontrados se muestran en la Figura 4.25, mientras los ajustes de todas las zonas se encuentran en el Anexo.1.



**Figura 4.25:** Ajustes al modelo de Gutenberg-Richter, donde los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  son obtenidos con la metodología de Máxima Verosimilitud. a) y b) ejemplos de ajustes simples; c) y d) ejemplos de ajustes dobles.

Por otra parte, se ha dedicado especial atención, en este trabajo de tesis, a la estimación de la magnitud máxima esperada ( $M_{max}$ ) en cada una de las zonas. Teniendo en cuenta la incertidumbre de este parámetro, con el fin de introducirla posteriormente en los cálculos de peligrosidad, por lo que, la  $M_{max}$  no se ha considerado como un valor único, sino que se ha modelizado mediante una distribución de probabilidad uniforme entre un umbral inferior, denominado ML, y otro umbral superior, denominado Mu. Así se trata de capturar la incertidumbre aleatoria inherente a la  $M_{max}$  considerando todos los valores que puede tomar este parámetro entre los dos valores umbrales [ML, Mu]. La semi anchura del intervalo es una medida de la dispersión entorno a la  $M_{max}$ , ( $Mu-ML/2 = \Delta$ ), situándose la  $M_{max}$  en el centro del intervalo, pero considerando su desviación, de modo que:

$$ML = M_{max} - \Delta \tag{4.6}$$

$$Mu = M_{max} + \Delta \tag{4.7}$$

En la mayor parte de las zonas no es trivial la determinación de posibles valores de  $M_{max}$  y de su distribución, por lo que ha sido necesario hacer una serie de consideraciones y ajustes basados en la sismicidad observada y en los datos disponibles de las fallas existentes, que

permiten una estimación de la  $M_{max}$  con criterios geológicos. Una problemática diferente que a continuación se detalla se encuentra en las zonas corticales y en las de subducción.

Para la determinación de la  $M_{max}$  en las zonas corticales se ha aplicado la correlación propuesta por Stirling et al. (2002), que relaciona la longitud de las fallas consideradas activas (L) y la Mw que se puede esperar como consecuencia de su ruptura. La forma funcional de dicha correlación es  $Mw = a + b \log (L)$ , siendo a y b constantes numéricas derivadas empíricamente a partir del análisis de regresión de 167 terremotos registrados en época instrumental, quedando finalmente la relación planteada de la siguiente manera:

$$Mw = 5.45 + 0.95 \log (L) \quad (4.8)$$

Denominamos a esta magnitud estimada con criterio geológico,  $M_G$ . Para su cálculo se ha considerado la base de datos de fallas cuaternarias de Egüez et al. (2003), junto con información complementaria de Chunga (2010). Dependiendo del número de fallas existentes en cada zona se hacen diferentes aproximaciones:

- En la mayor parte de las zonas corticales se tiene conocimiento de la presencia de fallas en número suficiente como para ajustar los valores resultantes de  $M_G$  (en función de la longitud de las fallas) a una distribución de frecuencias (Figura 4.26). Se ha identificado entonces la  $M_{max}$  como la magnitud media de la distribución ( $\bar{M}_G$ ) y el valor de  $\Delta$  como la diferencia entre la  $M_{max}$  y el valor extremo de la distribución ( $M_{max \text{ ext}}$ ). En este caso  $Mu = M_{max \text{ ext}}$ :

$$M_{max} = \bar{M}_G \quad (4.9)$$

$$\Delta = M_{max \text{ ext}} - M_{max} \quad (4.10)$$

- En las zonas C1 y RI2, que contienen una sola falla cada una, se ha estimado  $M_G$  a partir de la longitud de dicha falla y el valor resultante de  $M_G$  se identifica con  $Mu$ . La magnitud máxima observada ( $M_{max \text{ obs}}$ ) se identifica con  $ML$  (Figura 4.26). Entonces,  $M_{max}$  y  $\Delta$  corresponden a:

$$M_{max} = (M_{max \text{ obs}} + M_G)/2; \quad (4.11)$$

$$\Delta = (M_G - M_{max \text{ obs}}) / 2 \quad (4.12)$$

- En las zonas RI1, RI4 y CR1, donde la magnitud máxima observada ( $M_{max \text{ obs}}$ ) procede de terremotos históricos de magnitud Mw 7.3, 7.6 y 7.4 respectivamente, cuyos valores son más altos que los estimados con criterio geológico ( $M_G$ ), se ha considerado la  $M_{max}$  como la magnitud media de la distribución  $\bar{M}_G$  y el valor de  $\Delta$  como la diferencia entre  $M_{max}$  y  $M_{max \text{ obs}}$ .

$$M_{max} = \bar{M}_G \quad (4.13)$$

$$\Delta = M_{max \text{ obs}} - \bar{M}_G \quad (4.14)$$

Cabe indicar que usualmente la  $M_{max}$  no debe ser menor que la  $M_{max \text{ obs}}$ . Sin embargo, se considera que en estas tres zonas la  $M_{max \text{ obs}}$  está sobreestimada, ya que los valores estimados por geología ( $M_G$ ) nos son compatibles con los altos valores observados. Estas zonas (RI1, RI4 y CR1) están localizadas en la Cordillera de los Andes, donde los valores de

$M_{\max \text{ obs}}$  corresponden a terremotos históricos que fueron estimados a partir de la intensidad macrosísmica, lo que conlleva grandes incertidumbres. Hay que tener en cuenta la escasa presencia de asentamientos humanos en esa época y la dificultad de asignar intensidades a partir de efectos en la naturaleza. Tomando esto en consideración, se ha decidido dar mayor credibilidad a la  $M_{\max}$  estimada por geología ( $\overline{M}_G$ ), pero asumiendo una desviación  $\Delta$  que cubra todo el rango entre la magnitud histórica observada ( $M_{\max \text{ obs}}$ ) y la derivada de criterios geológicos ( $\overline{M}_G$ ).

Los valores así estimados de  $M_{\max}$  para las zonas corticales se muestran en la Tabla 4.6, y su proceso detallado de cálculo se describe e ilustra en el Anexo 2.

Para las zonas de subducción interfase e in-slab, se ha partido del ajuste al modelo de Gutenberg-Richter y se ha analizado la tendencia que sigue la sismicidad hacia sus valores máximos, que resulta en el punto de corte de la recta con el eje X, ( $\ln(N)=0$ ), donde N representa el número teórico acumulado de sismos en su período de completitud. La magnitud que se obtiene en el punto de corte se denomina  $M_{GR}$ . En éste proceso se han identificado los siguientes casos:

- Cuando la magnitud  $M_{GR} > M_{\max \text{ obs}}$  se identifican  $M_L = M_{\max \text{ obs}}$  y  $M_U = M_{GR}$ . Se considera la  $M_{\max}$  como el valor medio, y  $\Delta$  como la semidiferencia entre ambas.

$$M_{\max} = (M_{GR} + M_{\max \text{ obs}})/2 \quad (4.15)$$

$$\Delta = (M_{GR} - M_{\max \text{ obs}})/2 \quad (4.16)$$

- Si  $M_{GR} < M_{\max \text{ obs}}$ , la  $M_{\max}$  se identifica con el valor de  $M_{\max \text{ obs}}$ , y  $\Delta$  con la diferencia entre ambas magnitudes:

$$M_{\max} = M_{\max \text{ obs}} \quad (4.17)$$

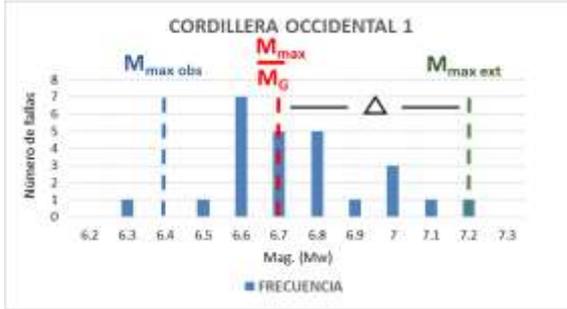
$$\Delta = M_{\max} - M_{GR} \quad (4.18)$$

- Por último, cuando  $M_{GR} = M_{\max \text{ obs}}$ , la  $M_{\max}$  corresponderá a este valor, y el valor de  $\Delta$  se identifica con la diferencia entre las dos magnitudes de mayor valor observadas en la zona; estos son los casos de Interfase Norte B e Interfase Sur.

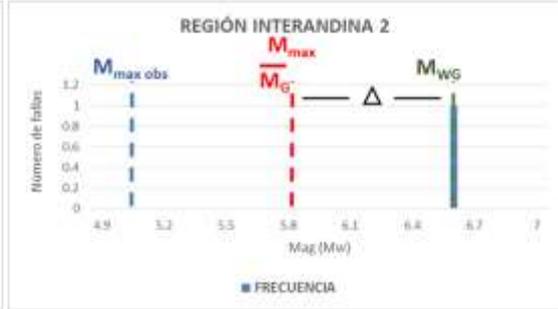
Los resultados de  $M_{\max}$  y  $\Delta$  obtenidos con las diferentes aproximaciones para las zonas de subducción se muestran en la Tabla 4.6.

La Figura 4.26 muestra algunos casos, a modo de ejemplo, de la diferente problemática encontrada, según la zona. El proceso seguido en todas las zonas definidas en los regímenes cortical, subducción interfase y subducción in-slab se incluyen en el Anexo 2.

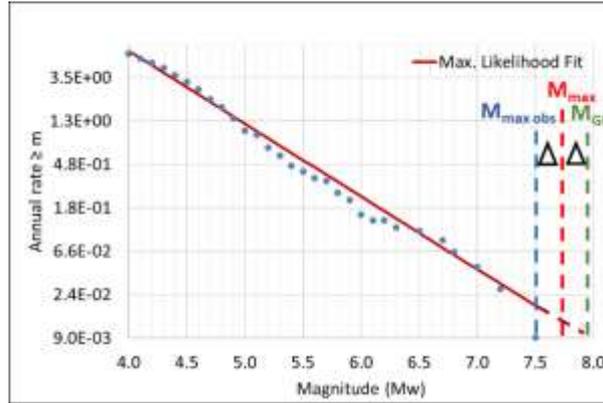
a) **Cordillera Occidental 1 (CO1).**



b) **Región Interandina 2 (RI 2).**



c) **In-Slab Sur (ISS).**



**Figura 4.26:** Ejemplos de los procedimientos seguidos para la estimación de la magnitud máxima dependiendo de la problemática de las distintas zonas. a) Zonas corticales con un número suficiente de fallas activas como para poder ajustar las magnitudes derivadas con criterio geológico en función de la longitud ( $M_G$ ) a una distribución de frecuencias. b) Zonas corticales con una única falla en su interior. c) Zonas de subducción, caso en que  $M_{GR} > M_{max\ obs}$ .

**Tabla 4.6:** Distribución de la  $M_{max}$  para las fuentes sismogénicas.

ÁREA-FUENTE	COD.	$M_{max\ obs}$	$\bar{M}_G$	$M_G$	$M_{max\ ext}$	$M_{GR}$	$M_{max}$	$\Delta$
<b>Sismicidad Cortical</b>								
Costa 1	C1	4.6	5.9	7.1			5.9	1.2
Costa 2A *	C2A	4.8				4.8	4.8	0.0
Costa 2B *	C2B	6.6	6.8		7.2		6.8	0.4
Costa 3	C3	4.8	7.0		7.2		7.0	0.2
Costa 4A *	C4A	4.6				4.6	4.6	0.0
Costa 4B *	C4B	5.6	6.9		7.2		6.9	0.3
Cordillera Occidental	CO1	6.4	6.7		7.2		6.7	0.5
Región Interandina 1	RI1	7.3	6.9		7.3		6.9	0.4
Región Interandina 2	RI2	5.0	5.8	6.6			5.8	0.8
Región Interandina 3	RI3	6.4	6.6		6.9		6.6	0.3
Región Interandina 4	RI4	7.6	6.7		7.1		6.7	0.9
Cordillera Real 1	CR1	7.4	6.8		7.4		6.8	0.6
Cordillera Real 2	CR2	5.1	6.9		7.3		6.9	0.4
Región Oriental 1	RO1	5.4	6.8		7.1		6.8	0.3
Región Oriental 2	RO2	7.0	7.1		7.5		7.1	0.4
Región Amazónica	A1	4.8	5.0			5.2	5.0	0.2
<b>Sismicidad Interfase</b>								
Interfase Norte A *	IFN_A	5.9				5.9	5.9	0.0
Interfase Norte B *	IFN_B	8.8				8.8	8.8	0.7
		8.1						
Interfase Centro A *	IFC_A	5.3				5.3	5.3	0.0
Interfase Centro B *	IFC_B	7.8				7.9	7.9	0.1
Interfase Sur	IFS	7.5				7.5	7.5	0.4
		7.1						
<b>Sismicidad In-Slab</b>								
In-slab Norte	ISN	7.2				6.8	7.2	0.4
In-slab Norte Centro	ISNC	6.5				7.5	7.0	0.5
In-slab Sur Centro	ISSC	7.5				7.4	7.5	0.1
In-slab Sur	ISS	7.5				7.9	7.7	0.2

Notación: \*, zonas con ajustes dobles; **COD**: Código identificador de cada zona;  $M_{max\ obs}$ : Magnitud máxima observada en la zona;  $\bar{M}_G$ : magnitud media de la distribución;  $M_G$ :  $M_w$  estimada con criterio geológico aplicando la correlación de Stirling et al. (2002);  $M_{max\ ext}$ :  $M_w$  extrema de la distribución de  $M_G$ ;  $M_{GR}$ :  $M_w$  observada por tendencia de la sismicidad en la curva de Gutenberg Richter;  $M_{max}$ :  $M_w$  máxima esperada;  $\Delta$ : medida de dispersión, estimada por los criterios anteriormente descritos.

Los parámetros de sismicidad resultantes, que constituyen uno de los inputs de cálculo de la peligrosidad, se resumen en la Tabla 4.7.

Es de destacar que en las zonas que se muestran con (\*), se han realizado dobles ajustes, por lo que se tienen dos juegos de parámetros que se identifican con la nomenclatura A y B en el código de la zona. La magnitud mínima  $m_0$  en los tramos A es de 4.0, coincidiendo con la  $m_0$  asumida para todas las zonas. Sin embargo, el valor de  $m_0$  para los tramos B es superior, marcando el umbral de las rectas de menor pendiente encontradas en los ajustes (Anexo 1).

**Tabla 4.7: Parámetros de Sismicidad.**

ÁREA FUENTE	CÓD.	ÁREA	$m_0$	$M_{max}$	$\Delta$	$\alpha$	$\beta$	$\sigma \beta$	$\dot{N}(m_0)$	$\dot{N}(m_0)/\text{ÁREA}$
<b>Sismicidad Cortical</b>										
Costa 1	C1	12950	4.0	5.9	1.2	10.74	1.99	1.65	0.32	2.47E-05
Costa 2A *	C2A	41619	4.0	4.8	0.0	17.42	2.96	0.29	2.54	6.10E-05
Costa 2B *	C2B	41619	4.9	6.8	0.4	10.96	1.59	0.70	0.27	6.44E-06
Costa 3	C3	19402	4.0	7.0	0.2	15.65	3.03	0.95	0.68	3.49E-05
Costa 4A *	C4A	24492	4.0	4.6	0.0	17.85	3.33	0.43	1.82	7.44E-05
Costa 4B *	C4B	24492	4.7	6.9	0.3	13.29	2.30	1.14	0.24	9.60E-06
Western Cordillera	CO1	24433	4.0	6.7	0.5	15.72	2.88	0.52	1.31	5.35E-05
Región Interandina 1	RI1	14389	4.0	6.9	0.4	7.96	0.98	0.31	0.26	1.79E-05
Región Interandina 2	RI2	3035	4.0	5.8	0.8	18.52	3.77	0.95	0.62	2.04E-04
Región Interandina 3	RI3	2778	4.0	6.6	0.3	9.41	1.47	0.47	0.34	1.20E-04
Región Interandina 4	RI4	6200	4.0	6.7	0.9	11.29	1.60	0.27	0.60	9.71E-05
Cordillera Real 1	CR1	18107	4.0	6.8	0.6	13.25	1.86	0.21	1.51	8.36E-05
Cordillera Real 2	CR2	74991	4.0	6.9	0.4	18.16	3.45	0.54	1.55	2.07E-05
Región Oriental 1	RO1	27569	4.0	6.8	0.3	15.59	2.83	0.46	1.40	5.07E-05
Región Oriental 2	RO2	47101	4.0	7.1	0.4	15.09	2.15	0.19	2.95	6.25E-05
Región Amazónica	A1	60682	4.0	5.0	0.2	12.68	2.43	1.21	0.38	6.23E-06
<b>Sismicidad Interfase</b>										
Interfase Norte A *	IFN_A	59914	4.0	5.9	0.0	14.06	1.87	0.10	6.61	1.10E-04
Interfase Norte B *	IFN_B	59914	6.0	8.8	0.7	8.74	1.00	0.37	0.14	2.37E-06
Interfase Centro A *	IFC_A	39396	4.0	5.3	0.0	14.55	2.09	0.14	4.48	1.14E-04
Interfase Centro B *	IFC_B	39396	5.4	7.9	0.1	10.29	1.30	0.39	0.24	6.12E-06
Interfase Sur	IFS	59122	4.0	7.5	0.4	13.99	1.87	0.11	6.21	1.05E-04
<b>Sismicidad In-Slab</b>										
In-slab Norte	ISN	81870	4.0	7.2	0.4	10.49	1.54	0.29	0.69	8.43E-06
In-slab Norte Centro	ISNC	49806	4.0	7.0	0.5	12.18	1.64	0.17	2.65	5.33E-05
In-slab Sur Centro	ISSC	66315	4.0	7.5	0.1	13.47	1.82	0.12	4.44	6.70E-05
In-slab Sur	ISS	202155	4.0	7.7	0.2	13.21	1.67	0.09	6.41	3.17E-05

Notación: \*, Zonas con ajustes dobles; **ÁREA**: área de la zona fuente (km<sup>2</sup>);  **$m_0$** : magnitud mínima para la tasa;  **$M_{max}$** :  $M_w$  máxima esperada;  **$\alpha$**  y  **$\beta$** : parámetros de la relación Gutenberg-Richter;  **$\sigma \beta$** : sigma de Beta;  **$\dot{N}(m_0)$** : tasa de eventos con  $M_w \geq m_0$ ;  **$\dot{N}(m_0)/\text{ÁREA}$** : tasa de eventos con  $M_w \geq m_0$  dividido entre el área de la zona fuente.

#### 4.3.4. SELECCIÓN DE MODELOS DE ATENUACIÓN.

Desafortunadamente no se dispone de acelerogramas registrados en Ecuador como para desarrollar un modelo local o para una hacer una calibración de modelos foráneos con datos locales. Por éste motivo, se ha desarrollado un análisis con la finalidad de elegir las ecuaciones de predicción de movimiento fuerte (GMPE) formuladas para subducción y corteza en el mundo que mejor se ajusten al ambiente tectónico que se observa en Ecuador.

En la publicación de Arango et al. (2012) se analiza la aplicabilidad de GMPEs para zonas de subducción de Sudamérica (Perú-Chile) y Centroamérica, utilizando bases de datos de ambas regiones. Entre las conclusiones de este trabajo se presenta el modelo de Youngs et al. (1997), como un modelo que, aunque antiguo, sigue siendo vigente y adecuado para eventos de subducción interfase e in-slab de Chile y Perú. Para zonas corticales el modelo de McVerry et al. (2006), desarrollado con datos de sismos de Nueva Zelanda, parece ajustar aceptablemente a los datos disponibles de Sudamérica, especialmente para periodos espectrales intermedios y largos. Finalmente, el modelo de Zhao et al (2006), desarrollado tanto para zonas corticales

como de subducción, a partir de registros de Japón, resulta capaz de predecir el movimiento en la región de Sudamérica, según resultados de calibraciones.

Otro criterio, es el publicado en la NEC-11, que menciona la utilización de ecuaciones de predicción válidas para las fuentes de subducción, destacando entre otras, las propuestas por Youngs et al. (1997), y Zhao et al. (2006). El trabajo de Beauval et al. (2014), desarrollado para el cálculo de la peligrosidad sísmica en Quito, considera la utilización de Zhao et al. (2006) para los tres regímenes tectónicos y de Youngs et al. (1997) para los regímenes tectónicos de subducción, mostrando la robustez y estabilidad del primero para todos los rangos de frecuencia en régimen cortical.

Aguiar et al. (2014a) utilizan el modelo de Zhao et al. (2006) para el cálculo de las aceleraciones tras el sismo superficial ocurrido el 12/08/2014, en las cercanías de la ciudad de Quito, obteniendo resultados aceptables al compararlos con las aceleraciones registradas de manera instrumental.

Al no disponer de información adicional que aporte algún criterio para la selección de otros modelos, se ha optado por hacer uso de los resultados del trabajo de Arango et al. (2012) y elegir los modelos que se incluyen en la Tabla 4.8, junto con sus principales características y rangos de aplicabilidad.

**Tabla 4.8:** Ecuaciones de predicción del movimiento del suelo.

Modelo	Código	Área	Reg. Tec.	N. Reg.	$M_{min}$	$M_{max}$	$R_{min}$	$R_{max}$	Tipo de R
Zhao et al. 2006	ZH06	Japón	CR, IT, IS	2763	5.0	8.3	0	300	Rrup
McVerry et al 2006	McV06	Nueva Zelanda	CR, IT, IS	435	5.0	7.0	6	400	Rrup
Youngs et al. 1997	Youngs97	Mundo	IT, IS	476	5.0	8.2	8.5	550	Rrup

**Reg.Tec:** Régimen tectónico; **CR:** cortical; **IT:** interfase; **IS:** in-slab;  **$M_{min}$ :** magnitud mínima.  **$M_{max}$ :** magnitud máxima.  **$R_{min}$ :** distancia mínima.  **$R_{max}$ :** distancia máxima. **Tipo de R:** tipo de distancia.

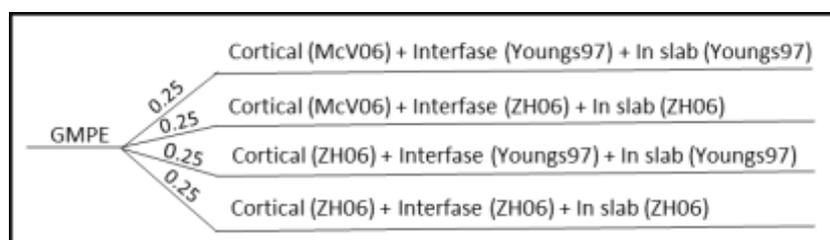
## 4.4. ESTIMACIÓN DE LA PELIGROSIDAD SÍSMICA EN ECUADOR.

Tomando como input los parámetros característicos de las zonas y las leyes de atenuación seleccionadas se ha procedido al cálculo de la peligrosidad sísmica siguiendo un planteamiento Probabilista PSHA descrito en el apartado 2.1.

Como ya se ha indicado, la aplicación de la metodología PSHA requiere la toma de decisiones para la cuantificación de las incertidumbres, tanto epistemológicas como aleatorias. En nuestro caso, se ha formulado un árbol lógico con un nodo, destinado a contemplar la variabilidad inherente a las posibles combinaciones de los modelos de atenuación seleccionados para los tres regímenes tectónicos identificados.

El nodo de atenuación se compone así de 4 ramas correspondientes a 4 combinaciones de los GMPEs elegidos. Cada rama combina modelos para zonas corticales, interface e in-slab.

Todas las ramas se ponderan con un mismo peso (0.25), porque no se ha encontrado ningún criterio para considerar una rama más probable que otra, siendo la suma de los pesos igual a 1. Este nodo de atenuación con sus correspondientes ramas se muestra esquemáticamente en la Figura 4.27.



**Figura 4.27:** Ramas del nodo del árbol lógico para capturar la incertidumbre inherente a los modelos de atenuación y pesos asignados.

Es de destacar que cada rama del árbol lógico no corresponde a un único GMPE, sino a una combinación de tres de ellos, uno por cada régimen tectónico.

#### 4.4.1. ESPECIFICACIONES DE CÁLCULO.

El cálculo de la peligrosidad propiamente dicho se ha realizado con el programa CRISIS 2012 v5.5 (Ordaz et al., 2013) en términos de aceleración pico PGA y aceleraciones espectrales SA(T) para varios periodos de interés ingenieril  $T = 0.1, 0.2, 0.5, 1, \text{ y } 2$  s. Todos los valores de aceleración se expresan en unidades de g. (aceleración de la gravedad,  $1g = 970 \text{ cm/s}^2$ ). Estas aceleraciones se han calculado para probabilidades de excedencia del 10, 5, y 2 % en 50 años, lo que corresponde a períodos de retorno de 475, 975 y 2475 años respectivamente.

La peligrosidad sísmica se ha estimado en puntos pertenecientes a una malla que cubre el Ecuador continental con una separación de  $0.1^\circ$  tanto en longitud como en latitud, comprendiendo 68 filas y 62 columnas.

La geometría de las fuentes se ha modelizado en el programa con forma poligonal. En el caso de la zonificación cortical, se han considerado los vértices de cada zona con una profundidad de 10 km. Para las zonas interfase e in-slab se adopta para cada vértice la profundidad correspondiente, según el modelo propuesto en este estudio (ver Figuras 4.21 y 4.24).

Tras estimar la peligrosidad en cada punto de la malla para el período de retorno y el parámetro de aceleración definido, se ha hecho uso de la aplicación ArcMap, disponible en el software ArcGIS 10.1, con la finalidad de generar una superficie continua que muestre la variación de la aceleración en el área de interés, para cada conjunto de resultados. Para el trazado de isóneas se han empleado técnicas de interpolación geoestadística kriging.

La Figura 4.28. muestra el proceso completo, desde la estimación de valores puntuales de aceleración PGA o SA (T) en cada punto de la malla definida hasta el trazado de isóneas.

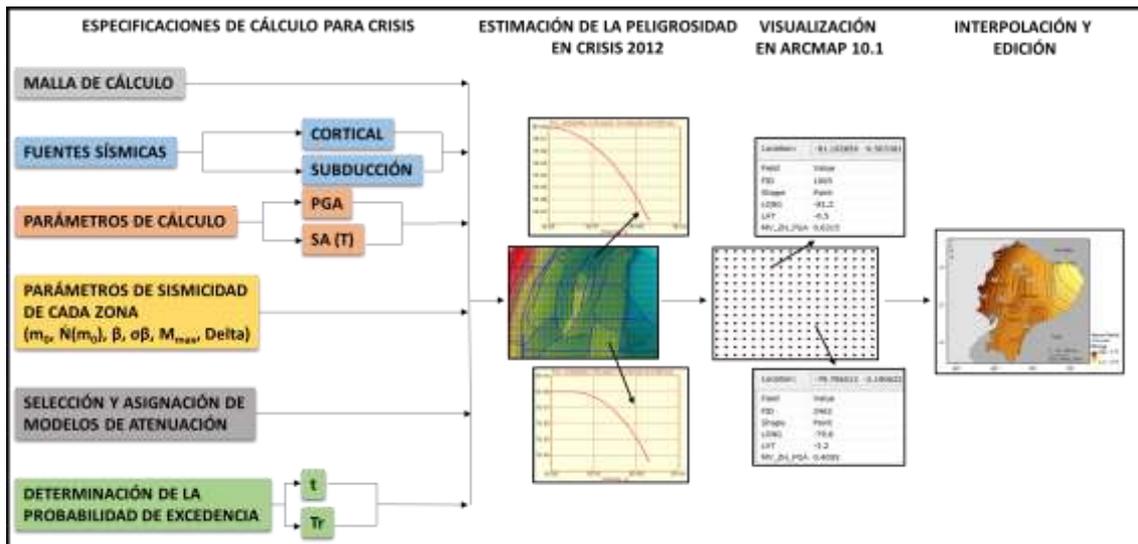


Figura 4.28: Esquema para la estimación de la peligrosidad.

## 4.4.2. RESULTADOS.

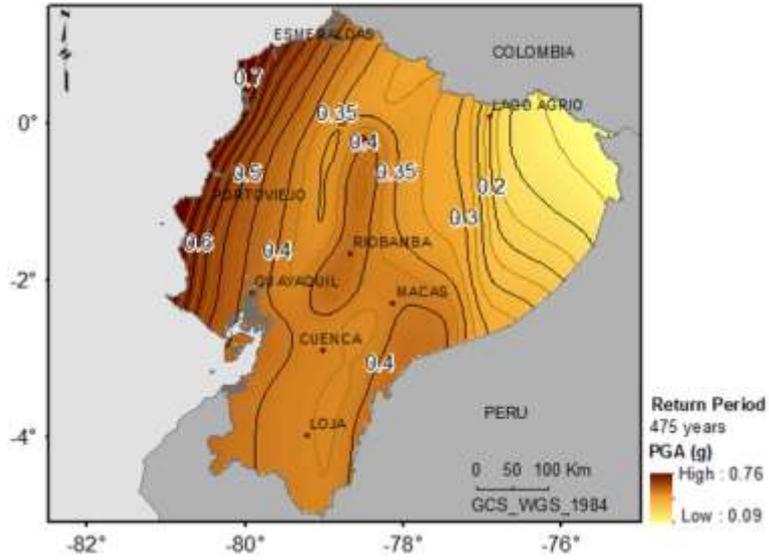
### 4.4.2.1. Mapas de peligrosidad.

Los primeros resultados obtenidos del cálculo de peligrosidad han sido los mapas expresados en términos de PGA y SA (1s) para tres períodos de retorno: 475, 975 y 2475 años.

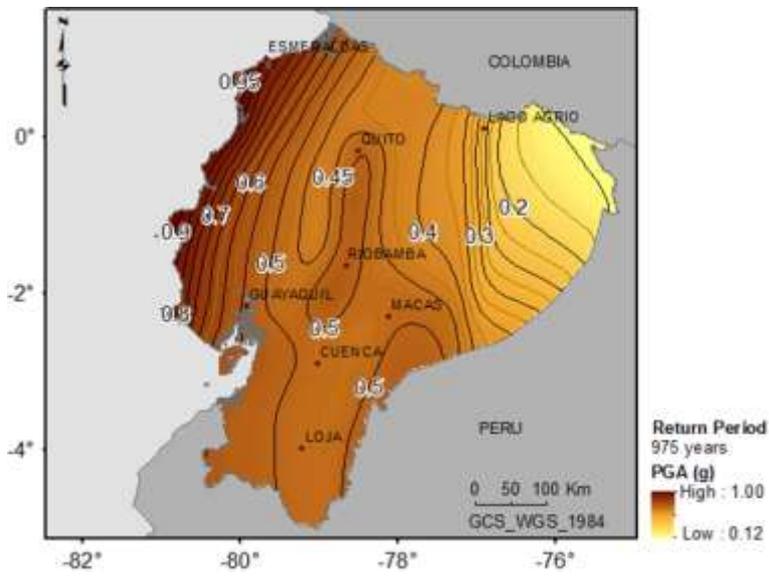
Estos mapas representan valores medios obtenidos con las cuatro combinaciones de modelos de atenuación y las distribuciones adoptadas para cuantificar la incertidumbre aleatoria de los parámetros de sismicidad. La Figura 4.29 muestra los mapas de PGA para los tres períodos de retorno y la Figura 4.30 muestra resultados similares en términos de SA (1s). El análisis de estos mapas permite resumir los siguientes resultados:

- Los mayores valores de PGA se presentan para los tres períodos de retorno en las zonas cercanas a la línea de costa ecuatoriana, especialmente en la Península de Santa Elena, Península de Manabí y Península de Esmeraldas. Se obtienen también valores altos en la región interandina y al sureste del territorio continental ecuatoriano, concretamente en la región de la Cordillera del Cóndor, donde además del fallamiento local se añade el efecto de la subducción.
- Para un período de retorno de 475 años, la PGA alcanza valores máximos de 0.76 g en la zona de la Península de Esmeraldas y 0.4 g en la Región Interandina y al sureste ecuatoriano. Al avanzar hacia el oriente la PGA decrece hasta valores menores a 0.15 g.
- La forma de las isolíneas de PGA para períodos de retorno de 975 y 2475 años son bastante similares, aunque los valores son mayores al aumentar el periodo de retorno. Se obtienen máximos de 1.0 y 1.37 g respectivamente en las zonas con mayor peligrosidad.
- En los mapas de peligrosidad en términos de SA (1s), los mayores valores son observados en la costa, haciendo evidente la gran influencia de la actividad de la subducción para el período estructural de 1s. Se observan valores máximos de 0.61 g, 0.87 g y 1.28 g para períodos de retorno de 475, 975 y 2475 años respectivamente.

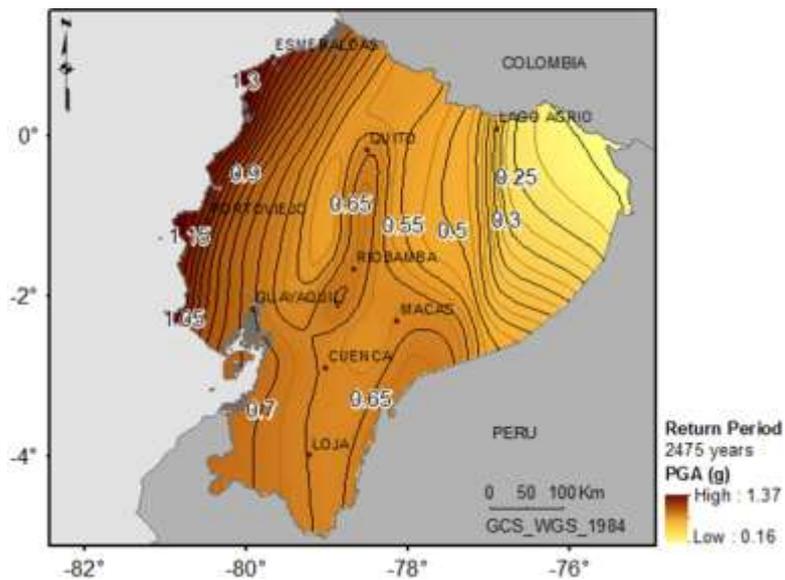
a)



b)

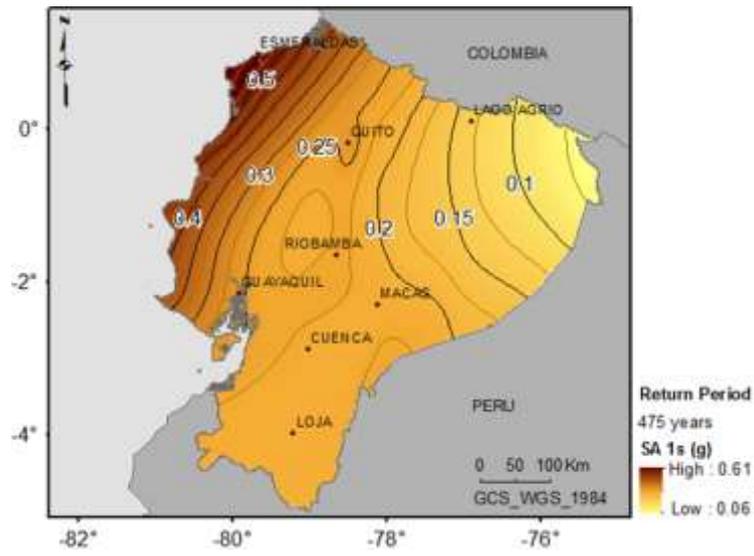


c)

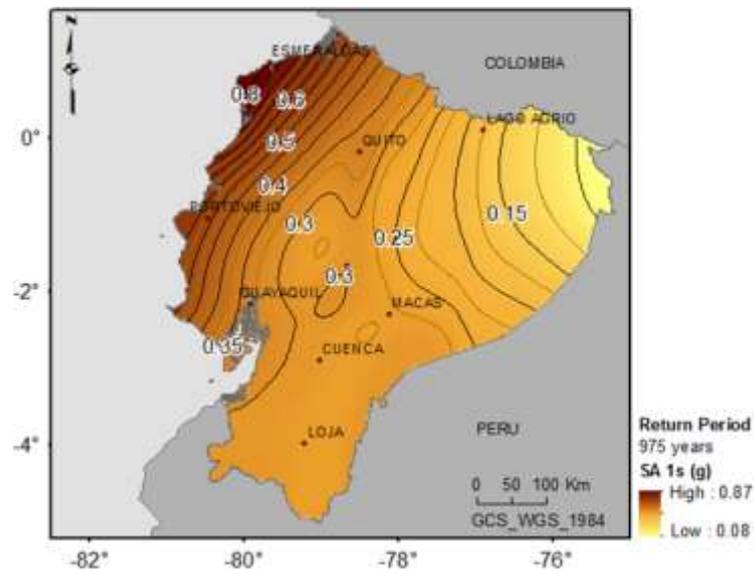


**Figura 4.29:** Mapas de peligrosidad sísmica del Ecuador en términos de PGA obtenidos en éste estudio para períodos de retorno de: a) 475 años, b) 975 años y c) 2475 años.

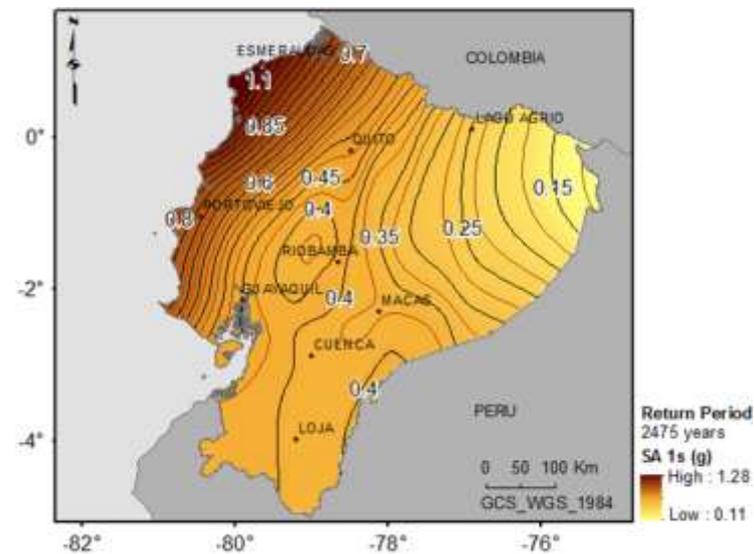
a)



b)



c)



**Figura 4.30:** Mapas de peligrosidad sísmica del Ecuador en términos de SA (1s) obtenidos en éste estudio para periodos de retorno de: a) 475 años, b) 975 años y c) 2475 años.

#### 4.4.2.2. Resultados específicos para cuatro capitales de provincia.

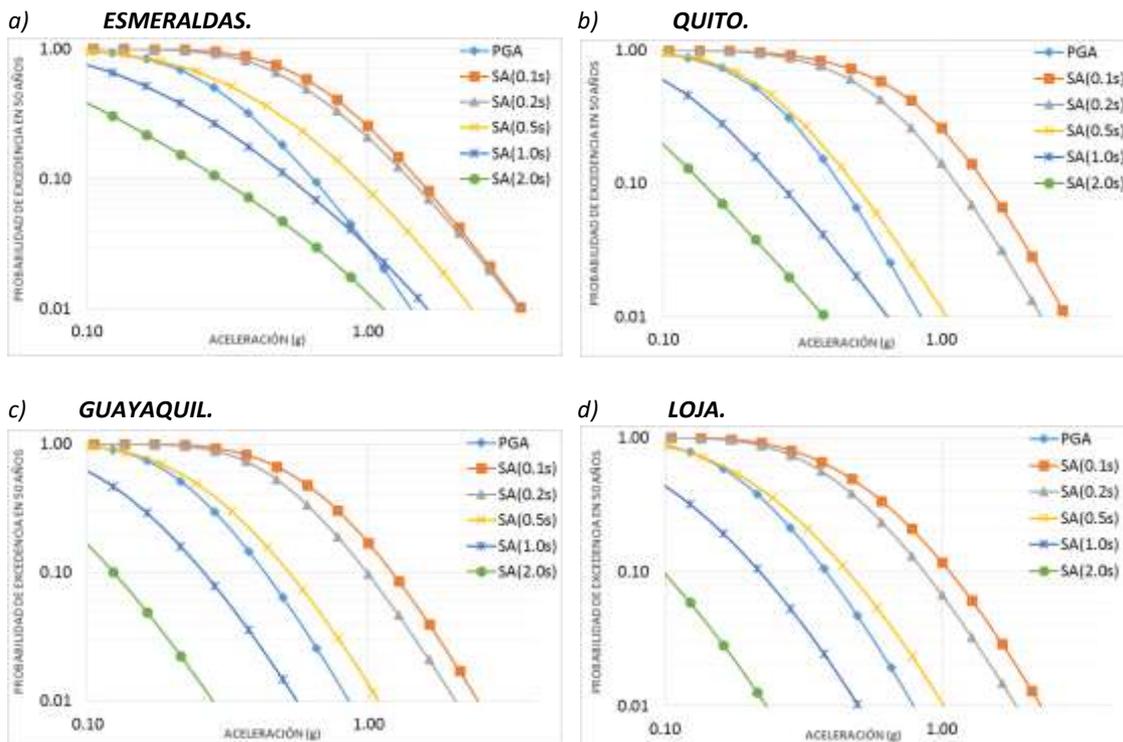
Se han seleccionado 4 ciudades para la obtención de resultados específicos de peligrosidad. Para ésta selección se han considerado factores como: 1) la ubicación geográfica, tratando de representar zonas con diferentes características físicas, geológicas y tectónicas del país, así como diferentes niveles de peligrosidad, 2) su densidad poblacional. Las cuatro capitales seleccionadas son incluidas, junto con sus principales datos geográficos y poblacionales, en la Tabla 4.9:

**Tabla 4.9:** Datos geográficos y poblacionales de las ciudades de estudio.

NOMBRE	LATITUD	LONGITUD	UBICACIÓN	POBLACIÓN (INEC)
Esmeraldas	0.9871	-79.6558	Costa Noroccidental	189.504
Quito	-0.1799	-78.4914	Cordillera de los Andes Norte	2.239.191
Guayaquil	-2.1629	-79.9115	Golfo de Guayaquil	2.350.915
Loja	-3.9878	-79.2058	Cordillera de los Andes Sur	214.855

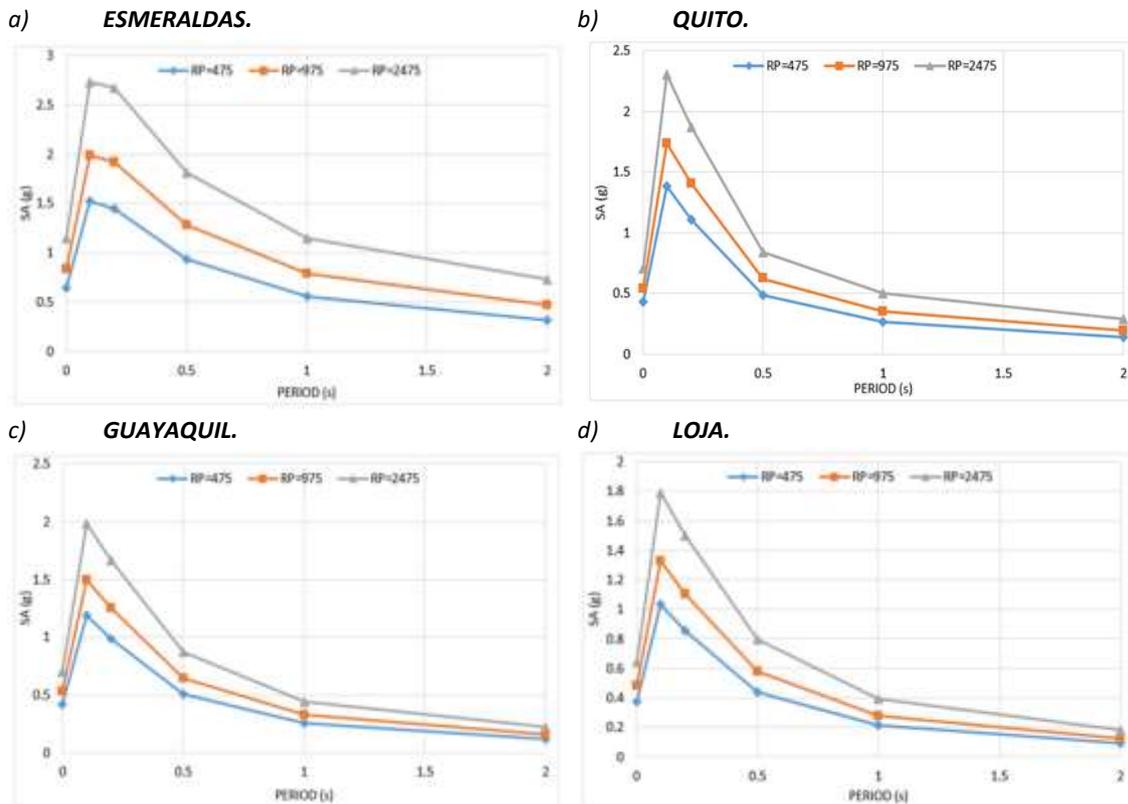
Notación: INEC, Instituto Nacional de Estadística y Censos del Ecuador.

En cada ciudad se han representado las curvas de peligrosidad para 6 parámetros representativos del movimiento fuerte: PGA, SA (0.1s), SA (0.2s), SA (0.5s), SA (1s) y SA (2s). Estos resultados se muestran en la Figura 4.31.



**Figura 4.31:** Curvas de peligrosidad para las ciudades de a) Esmeraldas, b) Quito, c) Guayaquil y d) Loja en términos de PGA y SA (T) en (g), para  $T = 0.1, 0.2, 0.5, 1$  y  $2$  s.

Además, para cada una de esas ciudades se han obtenido los espectros de peligrosidad uniforme (UHS), para los tres períodos de retorno 475, 975 y 2475 años, que se muestran en la Figura 4.32.

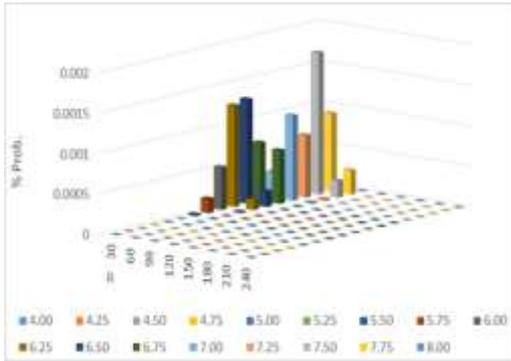


**Figura 4.32:** Espectros de peligrosidad uniforme obtenidos en cuatro ciudades del Ecuador para períodos de retorno de 475, 975 y 2475 años.

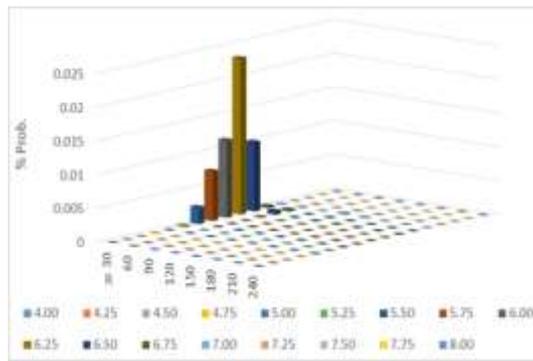
Para completar el estudio en cada ciudad, se ha efectuado en cada caso la desagregación de la peligrosidad para los movimientos objeto dados por la PGA y SA (1s), para los periodos de retorno de 475 y 2475 años. Se obtienen así los terremotos de control que más contribuyen a la peligrosidad en cada ciudad, para cortos y largos periodos estructurales y probabilidades de excedencia del 10 y 2 % en 50 años. Cada sismo de control se identifica como un par de magnitud y rango de distancia (Mw-R).

En la Figura 4.33 se muestra como resultado de la desagregación las contribuciones de diferentes intervalos de Mw y R al movimiento objeto dado por la PGA, para el período de retorno de 475 años en las cuatro ciudades. Similares resultados para SA (1s) son mostrados en la Figura 4.34.

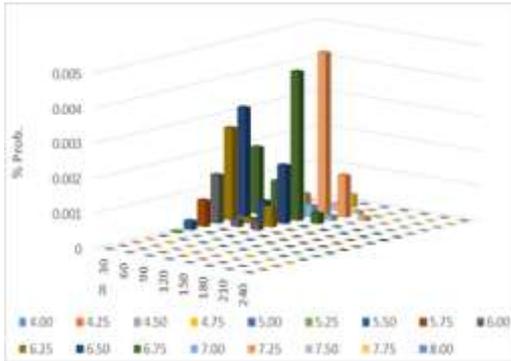
a) **ESMERALDAS.**



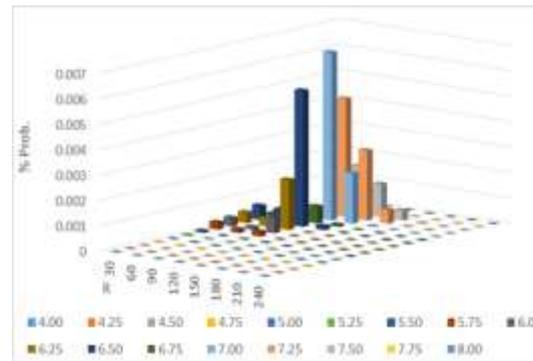
b) **QUITO.**



c) **GUAYAQUIL.**

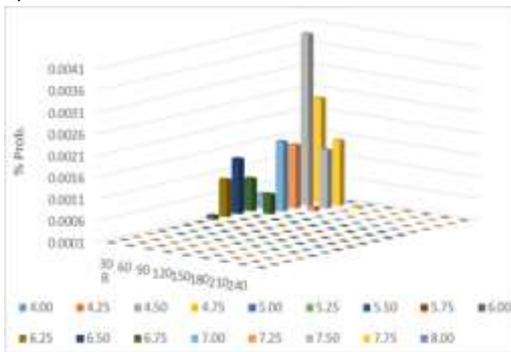


d) **LOJA.**

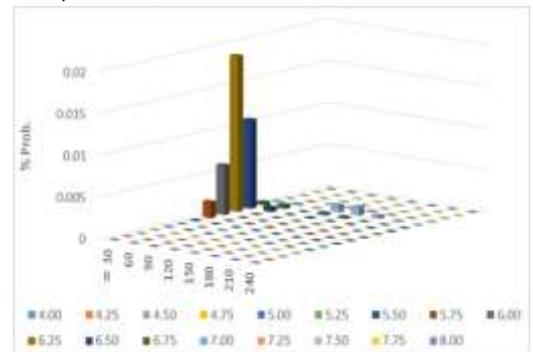


**Figura 4.33:** Resultados de la desagregación de la peligrosidad en las ciudades de Esmeraldas, Quito, Guayaquil y Loja. Se representan las contribuciones de los pares ( $M_w$ ,  $R$ ) al movimiento objeto dado por PGA para un período de retorno de 475 años.

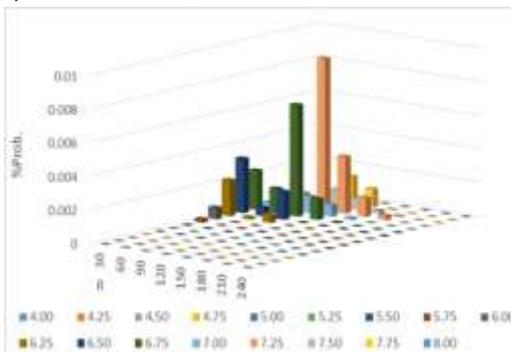
a) **ESMERALDAS.**



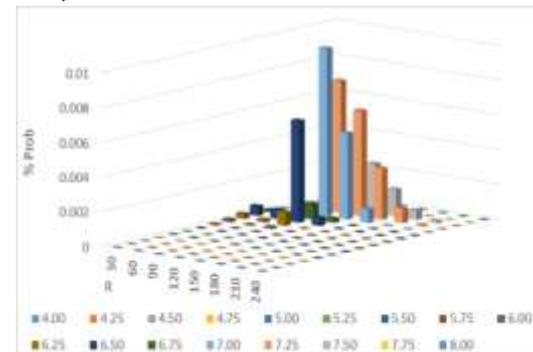
b) **QUITO.**



c) **GUAYAQUIL.**



d) **LOJA.**



**Figura 4.34:** Resultados de la desagregación de la peligrosidad en las ciudades de Esmeraldas, Quito, Guayaquil y Loja. Se representan las contribuciones de los pares ( $M_w$ ,  $R$ ) al movimiento objeto dado por SA (1s) para un período de retorno de 475 años.

Un resumen de los terremotos de control que más contribuyen en períodos estructurales cortos y largos para períodos de retorno de 475 y 2475 años es mostrado en la Tabla 4.10.

Es interesante señalar los cambios que se observan dependiendo del período de retorno y/o el período estructural, poniendo de manifiesto la sensibilidad del sismo de control a ambos tipos de periodos.

También se observa que, en el caso de la ciudad de Guayaquil, se identifican dos modos, que pueden asociarse a dos sismos de control, uno de magnitud moderada próximo y otro de mayor magnitud más distante.

**Tabla 4.10: Resultado de la Desagregación / Terremotos de Control.**

CIUDAD	TERREMOTO DE CONTROL	PERÍODO DE RETORNO 475				PERÍODO DE RETORNO 2475			
		PGA		SA(1s)		PGA		SA(1s)	
		Mw	R (km)	Mw	R(km)	Mw	R(km)	Mw	R(km)
<b>Esmeraldas</b>									
	CE1	7.50	30-60	7.50	30-60	6.50	0-30	6.50	0-30
<b>Quito</b>									
	CE1	6.25	0-30	6.25	0-30	6.25	0-30	6.25	0-30
<b>Guayaquil</b>									
	CE1	7.25	60-90	7.25	60-90	6.50	0-30	7.25	60-90
	CE2	-	-	6.75	60-90	-	-	6.50	0-30
<b>Loja</b>									
	CE1	7.00	60-90	7.00	60-90	7.25	60-90	7.25	60-90

Una vez revisados los resultados para cada una de las ciudades, se han podido destacar los siguientes aspectos:

- En la ciudad de Esmeraldas, para un período de retorno de 475 años se identifica un claro sismo de control caracterizado por el par ( $M_w$  7.50,  $R=$  30-60 km), tanto para el movimiento dado por la PGA como para SA (1s), es decir para cortos y largos periodos estructurales. Para  $TR=$  2475 años el terremoto de control se identifica con el par ( $M_w$  6.50,  $R=$  0-30 km). Debido a que las fuentes de corteza y subducción están localizadas a cortas distancias en Esmeraldas, no se podría identificar con claridad la fuente responsable para estos terremotos de control.
- En Quito, el par ( $M_w$  6.25,  $R=$  0-30 km) representa un claro terremoto de control, tanto para PGA como para el período estructural SA (1s), en los dos períodos de retorno. Estos eventos evidencian que la peligrosidad de Quito podría estar dominada por fallas ubicadas en la zona fuente RI 3. Alvarado et al., (2014), realizó un estudio del sistema de fallas Quito, localizando segmentos de fallas cuyas longitudes de ruptura podrían relacionarse a magnitudes en el rango de  $M_w$  6.0-6.4.
- En Guayaquil resulta un claro sismo de control para los dos periodos de retorno analizados, dado por el par ( $M_w$  7.25 y  $R=$  60-90 km), que podría ser identificado con un terremoto en la zona In-slab Sur Centro (ISSC). Un interesante caso es observado para un  $TR=$  2475 años y SA(1s), cuyo sismo de control resulta dado por el par ( $M_w$  6.50,  $R=$  0-30 km), que podría ser asociado con la actividad de fallamiento local, posiblemente debido a las fallas Carrisal o Colonche, localizadas en la zona de corteza C2. Esto podría ocurrir

debido a que la tasa de sismicidad de la zona de corteza (C2), es más baja que la tasa de sismicidad de la zona de subducción (ISSC). Por ello su contribución a la peligrosidad será notoria en éste período de retorno. Para SA(1s) y TRs de 475 y 2475 años, resultan otros dos pares, aunque con menor densidad de probabilidad: (M<sub>w</sub> 6.75, R= 60-90 km) y (M<sub>w</sub> 6.50, R= 0-30 km). Estos podrían ser asociados con la subducción interfase y la actividad de corteza.

- En la ciudad de Loja para TRs de 475 y 2475 años, resulta un terremoto de control asociado al par (M<sub>w</sub> 7.00-7.25, R= 60-90 km), para ambos períodos estructurales, que podría identificarse con la zona fuente In-slab Sur (ISS).

## 4.5. DISCUSIÓN.

El resultado del estudio más reciente de peligrosidad sísmica publicado en Ecuador corresponde al mapa de zonas sísmicas publicado en la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-11), realizado con un enfoque probabilista, para un 10% de probabilidad de excedencia en 50 años (período de retorno de 475 años). Este mapa determina 6 zonas sísmicas en las que la aceleración en roca abarca un rango desde PGA= 0.15 g en el nor-oriente hasta PGA≥ 0.50 g en la Zona VI, correspondiente al litoral ecuatoriano. No obstante, la NEC-11 establece un valor de saturación de 0.50 g, por lo que las poblaciones ecuatorianas que se encuentran en el litoral, aunque resultaran inicialmente con mayores aceleraciones, adoptan el valor de 0.50 g como aceleración de cálculo.

Al analizar los resultados de PGA para un período de retorno de 475 años en roca, obtenidos en el presente estudio y los publicados en la NEC-11, se observan valores similares tanto en el oriente ecuatoriano como en la sierra central. Sin embargo, en la zona sur del país los valores de PGA aquí obtenidos son más altos que los dados en la NEC-11, coincidiendo mejor con las aceleraciones expuestas en la Norma Peruana de Diseño Sismorresistente (Norma E.30, Diseño Sismorresistente). En el norte del Ecuador las PGA aquí obtenidas son algo más bajas que las de NEC-11, pero más consistentes con las de la Norma Sismorresistente de Colombia (NSR-10, Reglamento Colombiano de Construcción Sismorresistente).

En la Tabla 4.11 se presentan los valores de PGA obtenidos puntualmente en cuatro capitales de provincia para un periodo de retorno de 475 años comparados con los del NEC-11. Las menores diferencias se observan en las ciudades de Guayaquil y Quito, donde este estudio estima valores ligeramente más altos, con diferencias de 0.02-0.03 g. Esta diferencia se acentúa en Loja, con valores también mayores, incrementando la PGA de la NEC-11 en aproximadamente 0.13 g. El valor de 0.38 g dado en el presente estudio es más congruente con los valores presentados en la frontera Norte de la Norma E.30. Finalmente, en la ciudad de Esmeraldas no se podría realizar un balance, debido al valor de saturación de 0.50 g adoptado por la NEC-11, aunque se indica que el valor de la aceleración para esa región es ≥ 0.50 g.

**Tabla 4.11:** Valores de PGA (g) para las ciudades del estudio.

	ESMERALDAS	QUITO	GUAYAQUIL	LOJA
<b>ÉSTE ESTUDIO</b>	0.65	0.43	0.42	0.38
<b>NEC 2011</b>	≥ 0.50	0.40	0.40	0.25

La determinación de la magnitud máxima esperada en cada zona, influye directamente en la variabilidad de los niveles de aceleración que se obtienen posteriormente en los cálculos de la peligrosidad. En el presente trabajo se presenta una propuesta para su determinación, considerando todos los datos geológicos y sismológicos disponibles y su incertidumbre asociada.

La selección de modelos foráneos para la predicción del movimiento del suelo con límites de aplicabilidad tanto en magnitudes bajas como altas, todavía constituye una de las principales fuentes de incertidumbre en el análisis de la peligrosidad sísmica. Por ello la generación de más datos acelerométricos locales contribuiría a un mejor control de ésta incertidumbre en futuros estudios.

Como resultados adicionales a los presentados en la NEC-11, en éste documento se presentan mapas de peligrosidad en términos de PGA para períodos de retorno de 975 y 2475 años, mapas de peligrosidad en términos de SA (1s) para períodos de retorno de 475, 975 y 2475 años, espectros uniformes de peligrosidad y desagregación de la peligrosidad en las ciudades mencionadas para diferentes períodos de retorno y períodos estructurales.



## **Capítulo 5**

# **ESTIMACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO EN LA PARROQUIA MARISCAL SUCRE (QUITO)**



## 5.1 INTRODUCCIÓN.

En la última parte de este proyecto de Tesis se ha desarrollado un estudio de riesgo sísmico a escala municipal, en la parroquia de Mariscal Sucre, de Quito. Dentro de dicha parroquia se localizan tres barrios: La Colón, La Floresta y Mariscal Sucre, cuyo parque inmobiliario será analizado para la estimación del daño probable asociado a una acción sísmica derivada del anterior estudio de peligrosidad.

En el presente capítulo se expone la aplicación práctica desarrollada para la estimación del riesgo, cuyo fundamento teórico y marco metodológico fueron descritos en el capítulo 2.

El trabajo se inicia con la elaboración de una base de datos georreferenciada, donde se almacena la información catastral del inventario inmobiliario, que se gestiona a través de un sistema de información geográfica.

Posteriormente se definirá el escenario de peligrosidad sísmica, a partir de los resultados obtenidos en la desagregación de la peligrosidad, el análisis de la tectónica local y el uso de un modelo de movimiento fuerte, que proporcione niveles de aceleración pico y espectrales, característicos de la acción sísmica para la que se calcula el riesgo.

Se identificarán después las tipologías constructivas dominantes en el parque inmobiliario y se asignarán sus correspondientes clases de vulnerabilidad, adoptando la escala propuesta en HAZUS (2003). Se considerarán además las curvas de capacidad y fragilidad correspondientes a cada tipología.

Para la estimación de las demandas de desplazamiento se utilizará el Método de Coeficiente de Desplazamiento Mejorado (IDCM, del inglés Improvement Displacement Coefficient Method), propuesto en FEMA 440 (2005), que dará como resultado el desplazamiento global máximo para cada tipología e interactuará con sus correspondientes curvas de fragilidad. De esta manera se determinarán probabilidades de alcanzar o superar estados de daño predefinidos.

Como resultado final, se obtendrán el número de edificaciones de cada tipología por estado de daño y el número de edificaciones con riesgo de habitabilidad para cada barrio identificado en la Parroquia Mariscal Sucre, para la acción sísmica definida.

## 5.2 ELABORACIÓN DE LA BASE DE DATOS GEORREFERENCIADA.

El estudio de riesgo sísmico requiere de la elaboración de una base de datos georreferenciada que permita la gestión de la información. Para el efecto se ha elaborado un sistema de información geográfica (SIG) que facilita el almacenamiento, edición, análisis y representación de datos espacialmente referenciados.

Entre los componentes que debe conjugar un SIG, se tiene por una parte el conjunto de datos geográficos que lo soportan y por otra los programas que gestionan esos datos (Cañada et al., 2007). En este trabajo, los datos provienen de la información catastral proporcionada por el Ilustre Municipio de Quito, en formatos CAD y Excel. La gestión de los mismos se realiza utilizando el módulo ArcMap de la plataforma ArcGIS versión 10.1.

Dado que el SIG representa aspectos de la realidad, los datos deben ser organizados de manera lógica y consistente para satisfacer los requerimientos que se espera atender. Para ello se ha almacenado la información sobre los distintos aspectos involucrados en el estudio del riesgo a modo de capas, cada una conteniendo un aspecto diferente.

Dependiendo de la información que contiene cada capa, se ha utilizado un modelo vectorial de polígonos o de puntos para representarla, organizado de la siguiente manera (Figura 5.1):

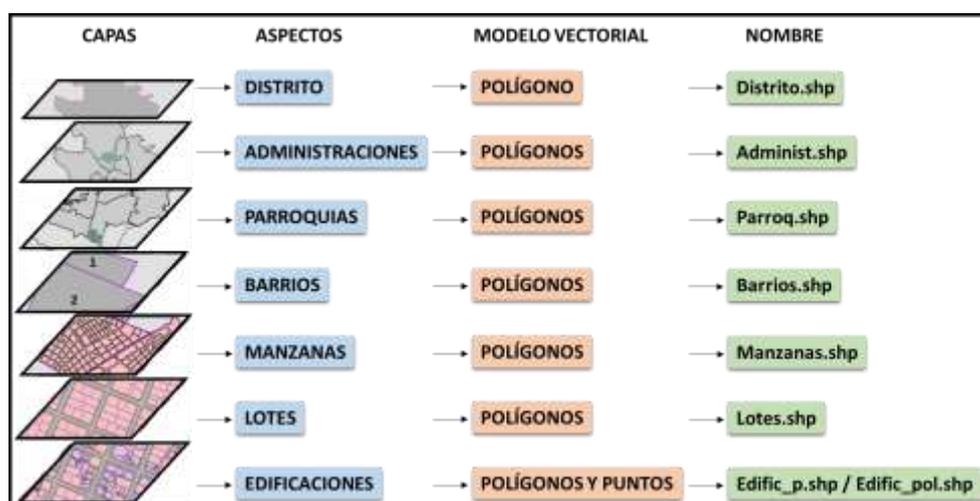


Figura 5.1: Organización del sistema de información geográfica.

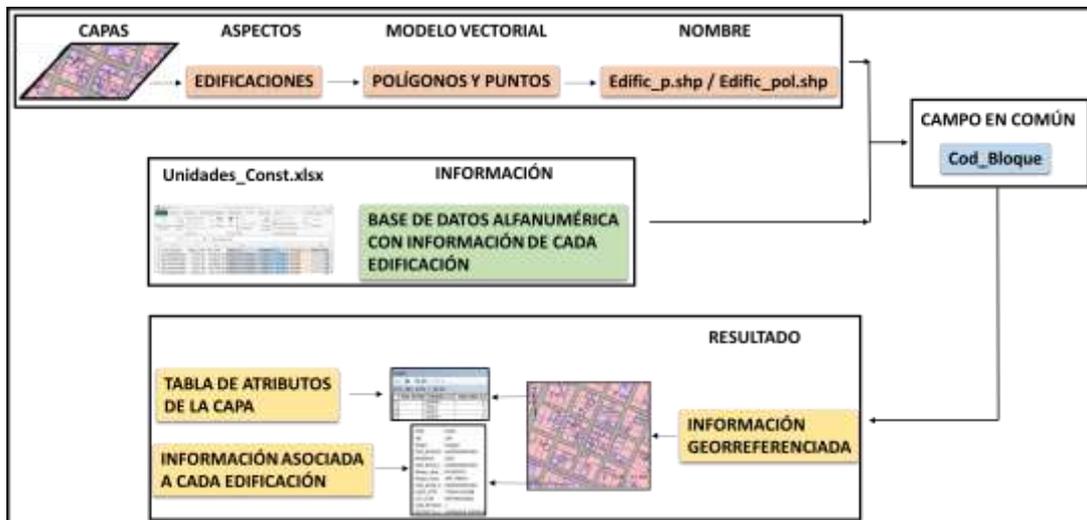
Una vez determinada la estructura del SIG, se ha procedido a la integración de la información recibida de la siguiente forma:

1. Los archivos en formato CAD contienen información geográficamente referenciada, que materializan los límites de las siguientes unidades espaciales: Distrito, Administraciones pertenecientes al Distrito Metropolitano de Quito, Parroquias pertenecientes a la Administración Norte, Barrios pertenecientes a la Parroquia Mariscal Sucre, Manzanas integrantes de cada Barrio, Lotes ubicados en cada Manzana y límites de las Unidades Constructivas de uso residencial. Estos archivos han sido transformados a formato shape (shp) como modelos vectoriales de polígonos irregulares y referenciados según el sistema de coordenadas UTM (del inglés Universal Transverse Mercator) zona 17 Sur para gestionarlos en ArcGIS 10.1 (Figura 5.1).
2. El archivo Unidades\_Const.xlsx, contiene información alfanumérica de cada una de las edificaciones que se localizan en la Parroquia Mariscal Sucre y está dividido en los siguientes campos de información:
  - Cod\_Bloque: representa el código catastral estructurado de acuerdo a la codificación del Sistema de Geolocalización Espacial, publicado en la Ordenanza Municipal 025 del 30 de agosto del 2007. La descripción del significado de cada serie numérica integrante del código se encuentra en la Tabla 5.1.

**Tabla 5.1:** Descripción del código catastral.

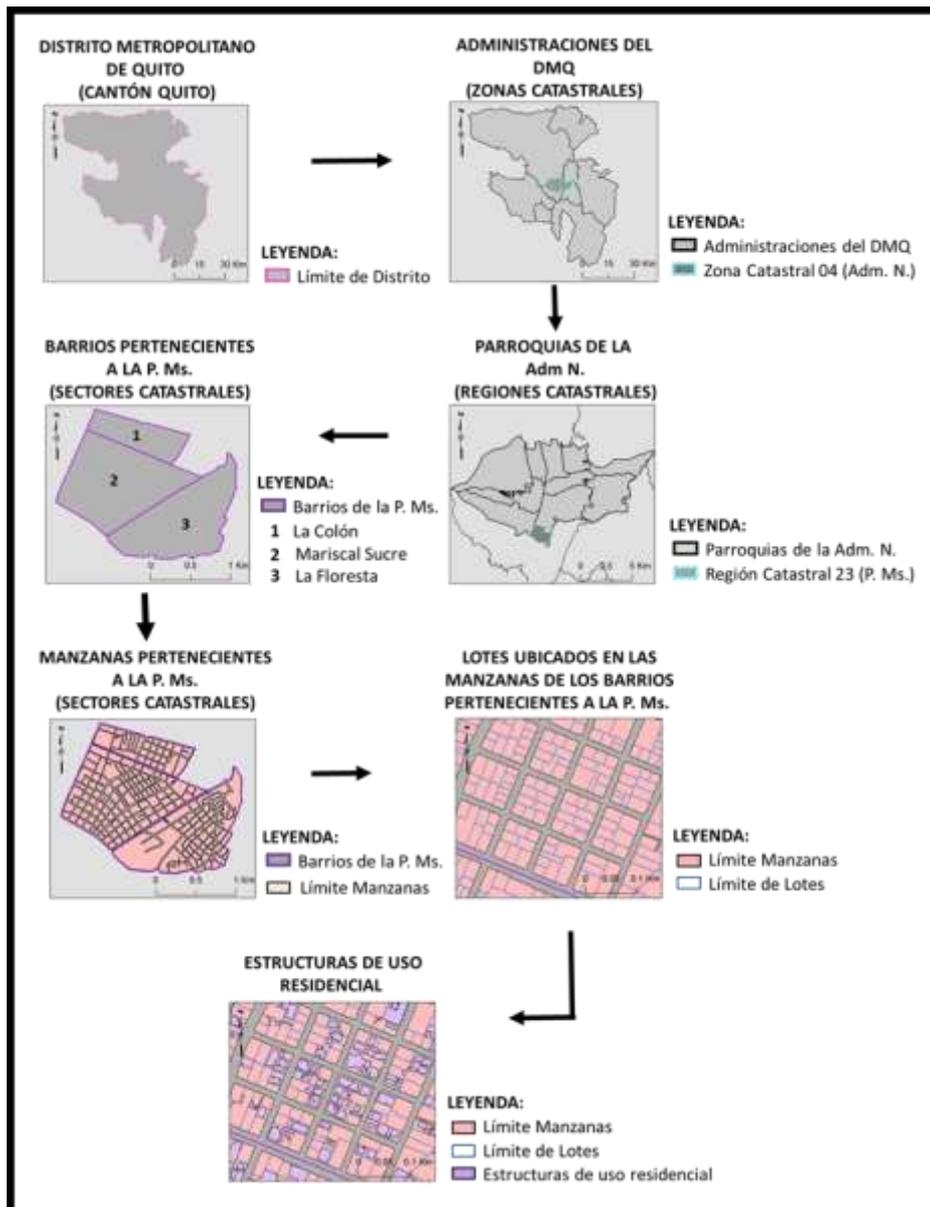
<b>170104230006004003</b>						
<b>17</b>	<b>01</b>	<b>04</b>	<b>23</b>	<b>0006</b>	<b>004</b>	<b>003</b>
Provincia	Cantón	Zona Catastral	Región catastral	Sector catastral	lote	Edificación

- Estructura: contiene la información sobre los materiales utilizados para la construcción de la edificación, realizando la siguiente diferenciación: Acero/Metálico, Adobe/Tapial, Hierro/Cercha, Hormigón armado, Ladrillo/Bloque y Madera.
  - Cerramiento: especifica los materiales usados para su construcción de acuerdo a la siguiente clasificación: Adobe/Tapial, Hormigón armado prefabricado y Ladrillo/Bloque.
  - Estado de conservación: informa del estado de conservación de la edificación bajo la calificación de: Muy bueno, Bueno, Regular y Malo.
  - Año\_Const: hace referencia al año de construcción de la edificación.
  - Uso\_Const: define el uso que se da a la edificación. Para el presente estudio se ha seleccionado el uso constructivo de carácter residencial.
  - Num\_pisos: hace referencia al número de pisos de cada edificación sobre rasante.
3. La integración entre de la base de datos alfanumérica de las edificaciones y la información gráfica, se ha realizado relacionando el campo Cod\_Bloque que es común en los archivos Unidades\_Const.xlsx, Edific\_p.shp y Edific\_pol.shp (Figura 5.2).



**Figura 5.2:** Integración de la información gráfica y alfanumérica.

La organización final, por capas de información, ha quedado estructurada de la siguiente manera (Figura 5.3):



**Figura 5.3:** Distribución administrativa del Ilustre Municipio de Quito organizada por capas de información. Notación: DMQ, Distrito Metropolitano de Quito; Adm. N., Administración Norte; P. Ms., Parroquia Mariscal Sucre.

### 5.2.1 ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LAS EDIFICACIONES.

Una vez estructurado el sistema de información geográfica, se ha observado que el 73% de las edificaciones tienen estructuras de Hormigón armado, siguiendo en porcentaje por el 21 % de Ladrillo/Bloque que es el más utilizado en el barrio Mariscal Sucre y menos frecuente en el barrio La Floresta (Figura 5.4).

Del análisis de material utilizado para el cerramiento se deduce que existe el predominio del Ladrillo/Bloque en toda la parroquia de estudio (Figura 5.5).

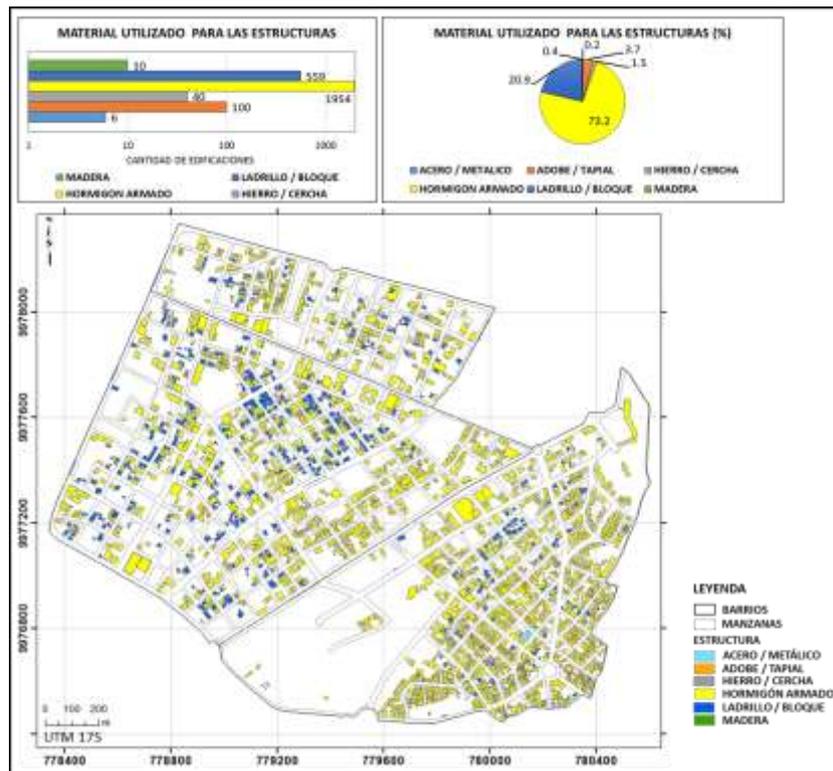


Figura 5.4: Distribución espacial de las edificaciones de uso residencial según el material utilizado en sus estructuras.

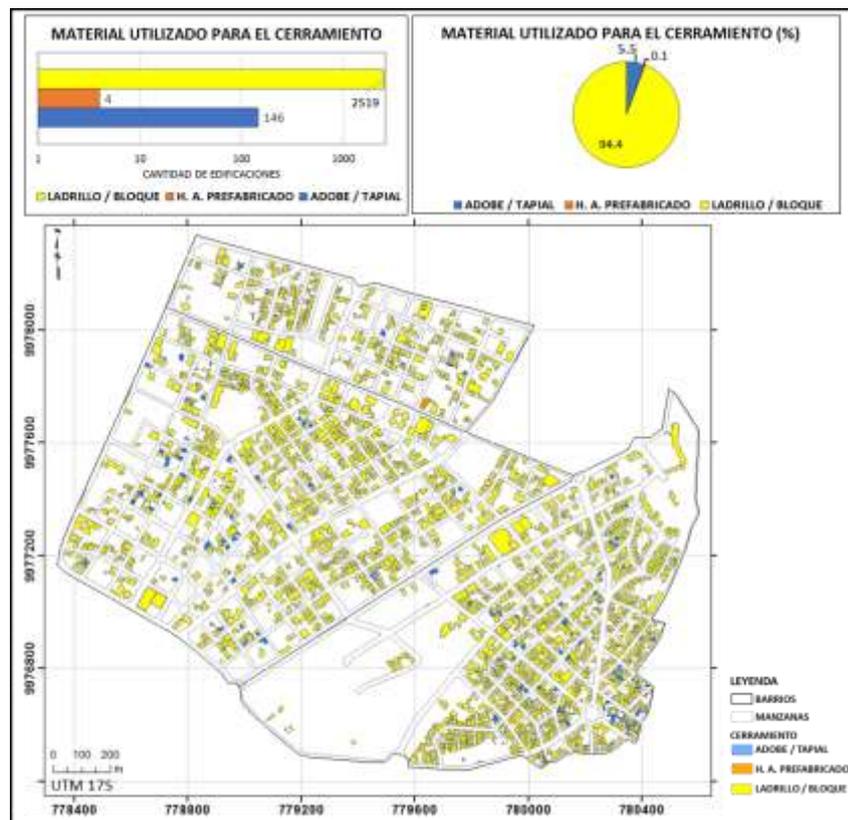
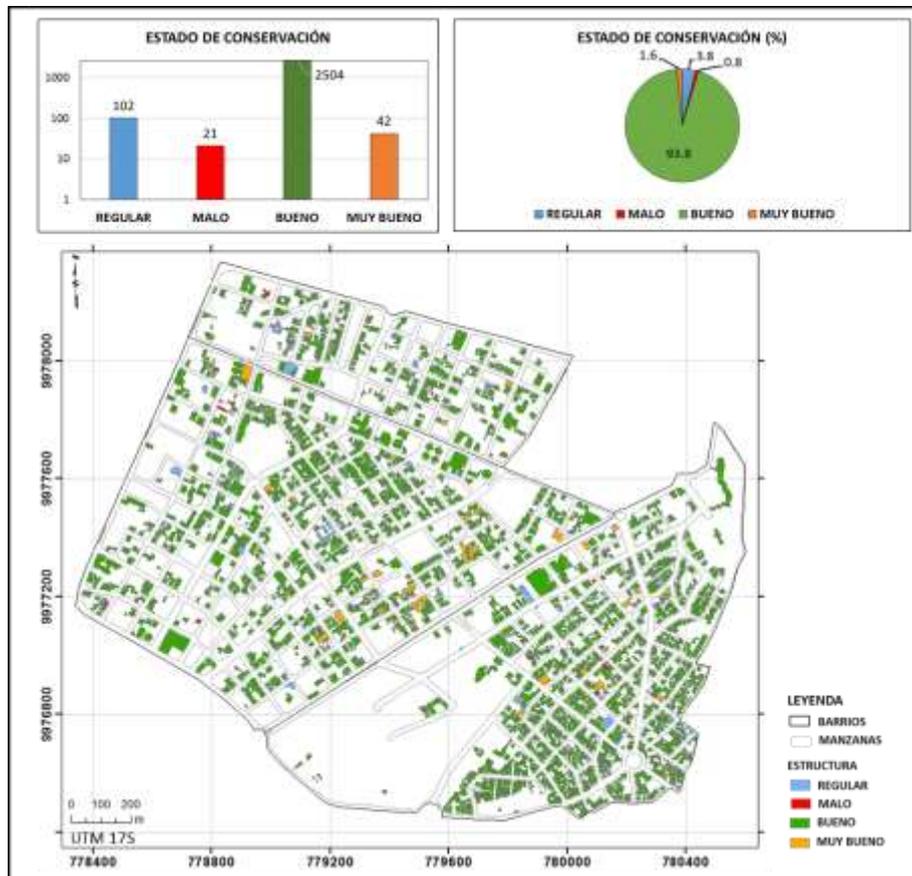


Figura 5.5: Distribución espacial de las edificaciones de uso residencial según el material utilizado en su cerramiento.

El análisis del estado de conservación de las edificaciones muestra que el 95.6 % de ellas se encuentran en estado Muy bueno y Bueno y un 2.4 % en Regular y Mal estado, observándose que su distribución es homogénea en toda la parroquia (Figura 5.6).



**Figura 5.6:** Distribución espacial de las edificaciones de uso residencial según el estado de conservación de las edificaciones.

Para el análisis del desarrollo temporal del inventario inmobiliario, se han considerado períodos definidos por la publicación de los códigos y normas de la construcción en Ecuador (ver apartado 1.2.1). Se ha observado que en el barrio Mariscal Sucre se localizan las edificaciones más antiguas. El desarrollo de los barrios La Floresta y La Colón se inicia en la década de 1950, siendo el período comprendido entre 1951 y 2001 en el que más edificaciones de uso residencial se han construido en los tres barrios (Figura 5.7).

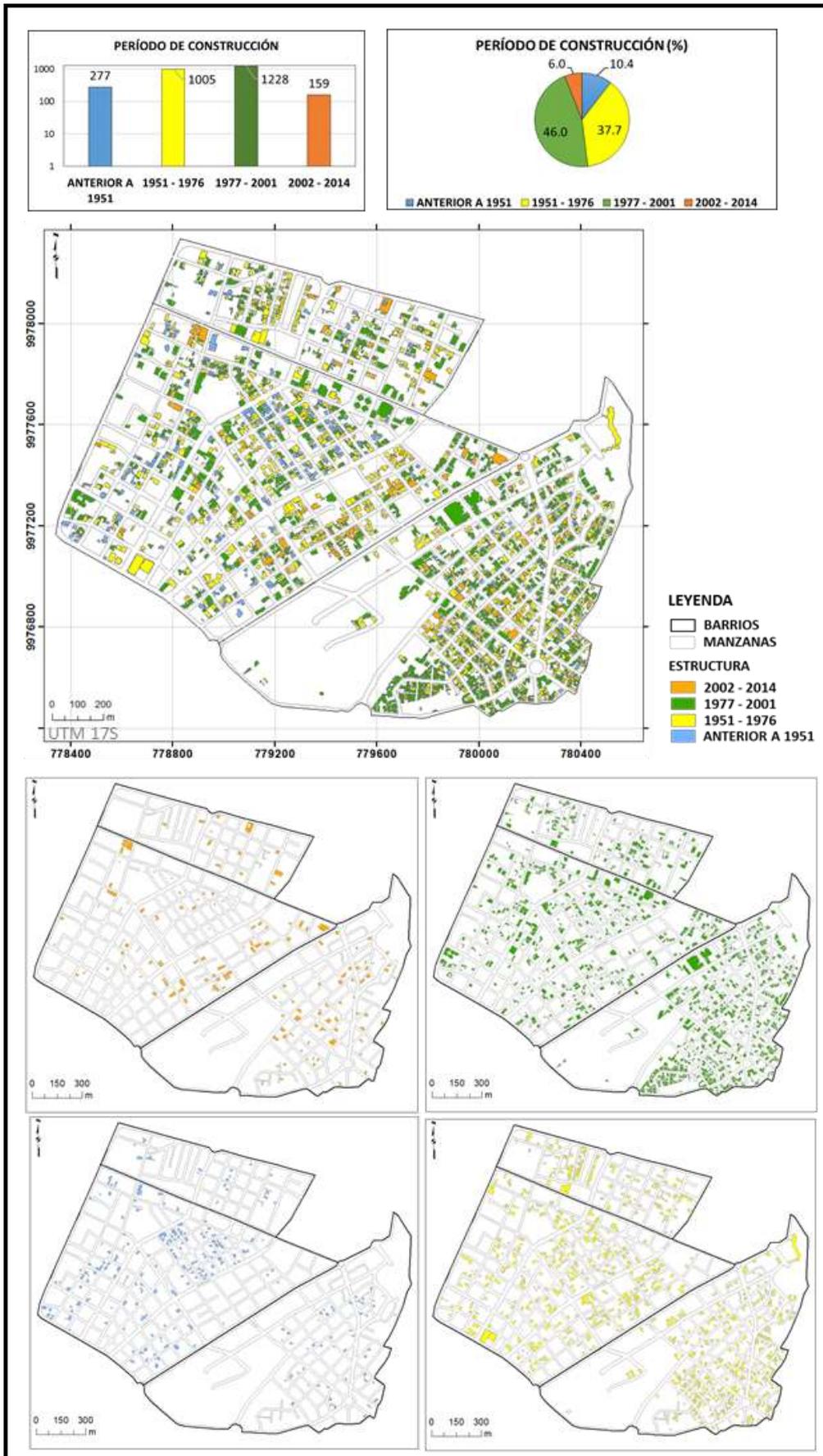


Figura 5.7: Distribución de las edificaciones por período de construcción.

## 5.3 ESCENARIO DE PELIGROSIDAD SÍSMICA.

Como se indicó en el apartado 2.2.3.1 el cálculo de riesgo requiere, en primer lugar, la definición de un escenario de peligrosidad para el que se determinará la acción sísmica a la que se someterán los elementos expuestos.

En el presente trabajo este escenario se plantea con carácter híbrido determinista-probabilista, efectuando la desagregación de la peligrosidad e identificando el sismo de control que más contribuye al movimiento objeto para cierto periodo de retorno.

### 5.3.1 IDENTIFICACIÓN DEL ESCENARIO SÍSMICO.

Para la caracterización de la acción sísmica asociada a un cierto sismo de control o escenario de peligrosidad, se debe identificar la estructura sismotectónica que sea capaz de generar dicho sismo, para lo cual deben desarrollarse las siguientes tareas:

1. Ubicación del sismo de control. Esta parte del trabajo se abordó en el capítulo 4, donde concretamente para Quito, la desagregación de peligrosidad para los valores de PGA y SA (1s) y para periodos de retorno de 475 y 975 años dio como resultado un claro un sismo de control caracterizado por el par ( $M_w$  6.25,  $R=$  0-30 km).

Analizando posibles zonas sismogénicas compatibles con el rango de distancias de 0 a 30 km y capaces de generar un sismo de magnitud de 6.25, se identifica la zona fuente RI 3. Esta sería entonces la fuente del escenario sísmico que consideramos para el cálculo del riesgo (Figura 4.19).

2. Localización de la estructura sismotectónica. Para acotar el escenario sísmico dentro de la fuente mencionada anteriormente, es necesario analizar la información tectónica disponible, con la finalidad de identificar la o las fallas capaces de generar el sismo de control deducido. La revisión de la literatura a este respecto lleva a destacar los trabajos que se citan a continuación:

Beauval et al. (2014) analizan las fuentes sísmicas influyentes en Quito y consideran que la amenaza podría estar controlada por la actividad en el régimen tectónico cortical, plantando la delimitación de dos opciones de fuentes corticales donde se ubica la ciudad de Quito.

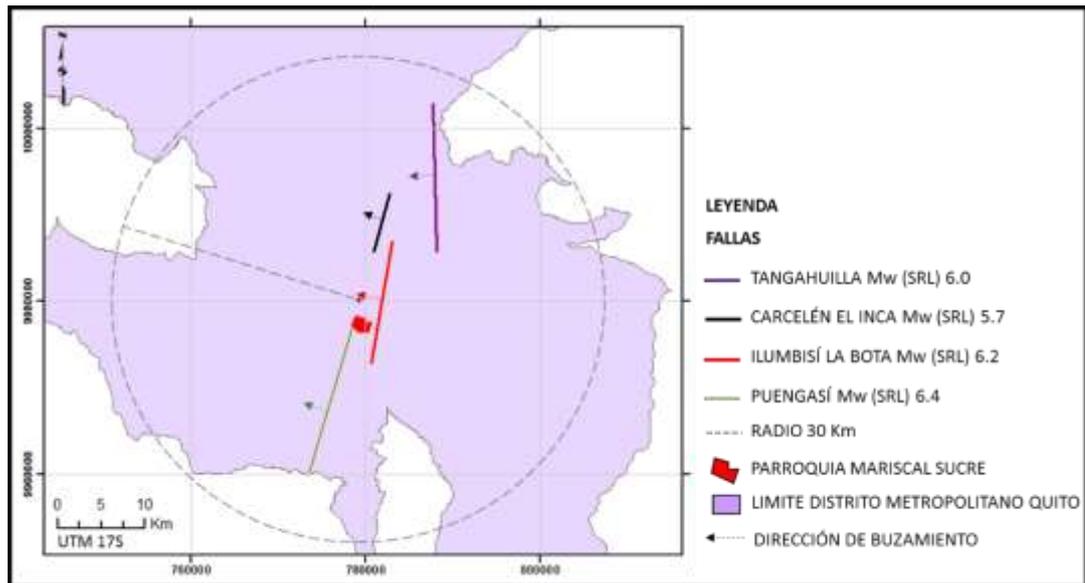
Aguiar et al. (2014a) y Aguiar et al. (2014b) realizan un análisis de GMPEs para el Centro Norte de Quito, considerando las aceleraciones registradas y calculadas por la ocurrencia del sismo de agosto del 2014, atribuido al segmento de falla Bellavista Catequilla al norte de la ciudad. En ambos trabajos se muestra la geometría del sistema de fallas Quito (Figura 5.8).

Alvarado et al. (2014) realizan un estudio de la tectónica activa de Quito y del sistema de fallas que cruza la ciudad, proporcionando información detallada de los segmentos que la conforman (Tabla 5.2).

**Tabla 5.2:** Parámetros que caracterizan los segmentos que conforman el Sistema de fallas Quito  
(Fuente: Alvarado et al., 2014).

FALLA	ÁREA RUPTURA (km <sup>2</sup> )	Mw (AR)	LONGITUD SUPERFICIE DE RUPTURA (km)	Mw (SRL)	DIP	RAKE
Carcelén el Inca	82	5.9	7.0	5.7	55.0	90.0
<b>Ilumbisí la Bota</b>	<b>176</b>	<b>6.2</b>	<b>15.0</b>	<b>6.2</b>	<b>55.0</b>	<b>90.0</b>
Puengasí	259	6.4	22.0	6.4	55.0	90.0
Tangahulla	108	6.0	12.0	6.0	55.0	90.0

Notación: Mw (AR), magnitud máxima estimada para el Área de Ruptura (AR); Mw (SRL), magnitud máxima estimada a partir de la ruptura en superficie; DIP, ángulo aproximado de buzamiento; Rake, ángulo aproximado de deslizamiento.



**Figura 5.8:** Representación del sistema de fallas activas de Quito (tomado de Aguiar et al., 2014a).

Teniendo en cuenta el sismo de control y las características tectónicas presentes en el área de estudio (Aguiar et al., 2014 a y b; Alvarado et al., 2014), se ha considerado que la Falla Ilumbisí la Bota satisface el condicionante de distancia (0-30 km) y podría generar un terremoto de la magnitud estimada en la desagregación de la peligrosidad (Mw 6.2).

### 5.3.2 CARACTERIZACIÓN DE LA ACCIÓN SÍSMICA.

Una vez identificado el escenario sísmico y la fuente capaz de generarlo, se debe calcular el movimiento esperado por la actividad de dicho escenario, es decir la acción sísmica que se utilizará posteriormente en el cálculo del riesgo.

Para ello se aplicará un modelo de movimiento fuerte o ecuación de predicción, que represente el efecto de propagación o la atenuación de las ondas con la distancia y proporcione los niveles de aceleraciones pico (PGA) y espectrales.

Este modelo se aplica ya con carácter determinista, pudiendo considerar el tipo de fuente (falla inversa), el tipo de suelo en cada sitio, distancia fuente-emplazamiento y otras variables, que permiten reducir la incertidumbre inherente a la aleatoriedad del movimiento para la magnitud y distancia del escenario.

A tal fin se ha seleccionado el modelo de Zhao et al. (2006), ya que según el análisis realizado en el apartado 4.3.4 de éste estudio, resulta el más adecuado para fuentes sísmicas relacionadas con el fallamiento cortical en Ecuador.

Este modelo considera como tipo de distancia la conocida Rrup, que es la distancia más corta de cada punto al plano de ruptura. Su aplicación requiere establecer, en primer lugar, las características de dicho plano. Estas características se incluirán en el modelo, para cuantificar el denominado “efecto fuente” en el movimiento que se quiere predecir.

**Efecto Fuente.**

El procedimiento utilizado para introducir el efecto de la fuente en el modelo, comprende los siguientes pasos:

1. Delimitación de los parámetros que definen la geometría de la falla (Tablas 5.3-5.4):

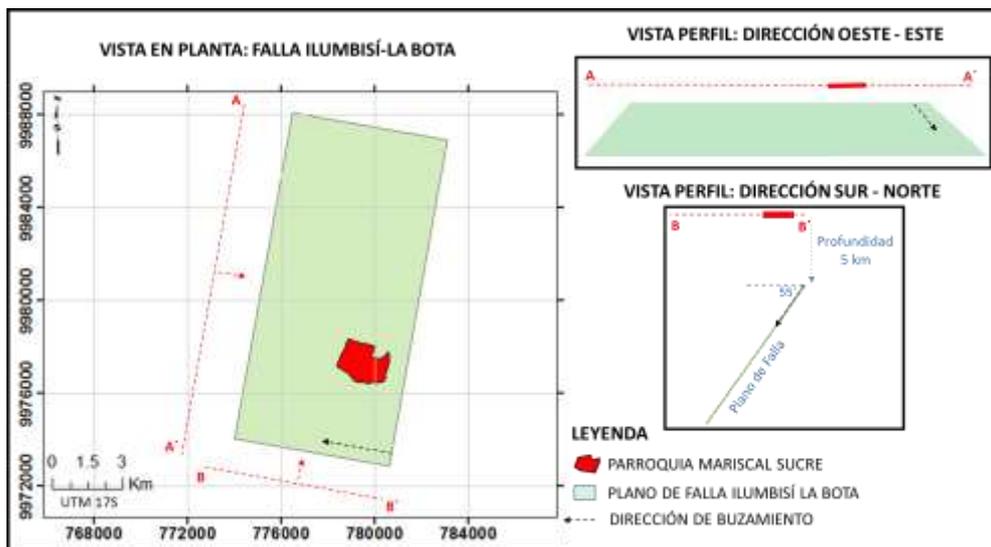
**Tabla 5.3: Parámetros geométricos de la falla Ilumbisí la Bota.**

Azimut	189.9°
Buzamiento ( $\beta$ )	55°
Profundidad (Ztor) (km)	5
Largo (L) (km)	15
Ancho (W) (km)	11.73

**Tabla 5.4: Ubicación geográfica del Plano de Falla, coordenadas UTM.**

PLANO DE FALLA	LONG (x) (m)	LAT (y) (m)	DEPTH (Z) (km)
P1	780599	9972870	-5
P2	773970	9974031	-14.781
P3	783059	9986919	-5
P4	776430	9988080	-14.781

2. Representación del plano de falla en relación a la ubicación de la parroquia Mariscal Sucre, donde se calcula el riesgo, (Figura 5.9):

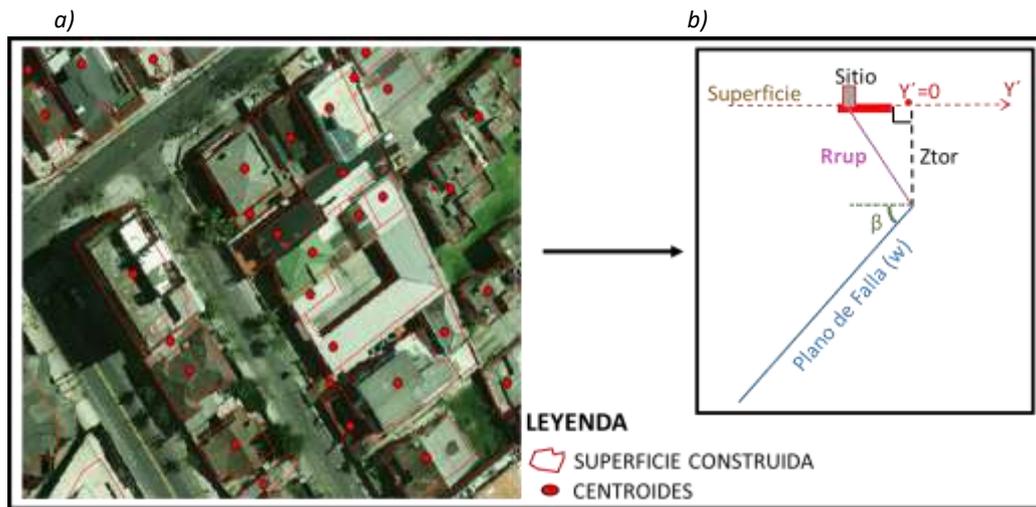


**Figura 5.9: Representación de la ubicación de la Parroquia Mariscal Sucre en relación al plano del segmento de falla Ilumbisí La Bota.**

## Efecto Trayectoria

El efecto de la trayectoria en la predicción del movimiento refleja la atenuación que experimentan las ondas sísmicas en su trayecto desde el foco a la superficie. Este efecto viene determinado esencialmente por la distancia recorrida.

En el modelo de Zhao et al. (2006), como ya se ha indicado, se utiliza la distancia más corta al plano de ruptura. Esta distancia se estima partiendo de los centroides de los polígonos que representan la superficie donde se ha construido la edificación hasta el plano de ruptura de la falla seleccionada (Figura 5.10).



**Figura 5.10:** Representación de la distancia desde el sitio donde se calcula el riesgo al plano de ruptura de la fuente. a) Centroides obtenidos con el módulo ArcMap; b) Esquema que representa la distancia al plano de ruptura de la fuente.

## Efecto de sitio

La predicción del movimiento requiere, además, considerar el efecto de sitio o efecto local, dependiendo del tipo de suelo en cada zona de estudio. Para ello se ha hecho una búsqueda documental, de estudios de microzonación, sondeos, etc., que aportan datos para poder incluir este efecto con el detalle requerido en un estudio a escala municipal.

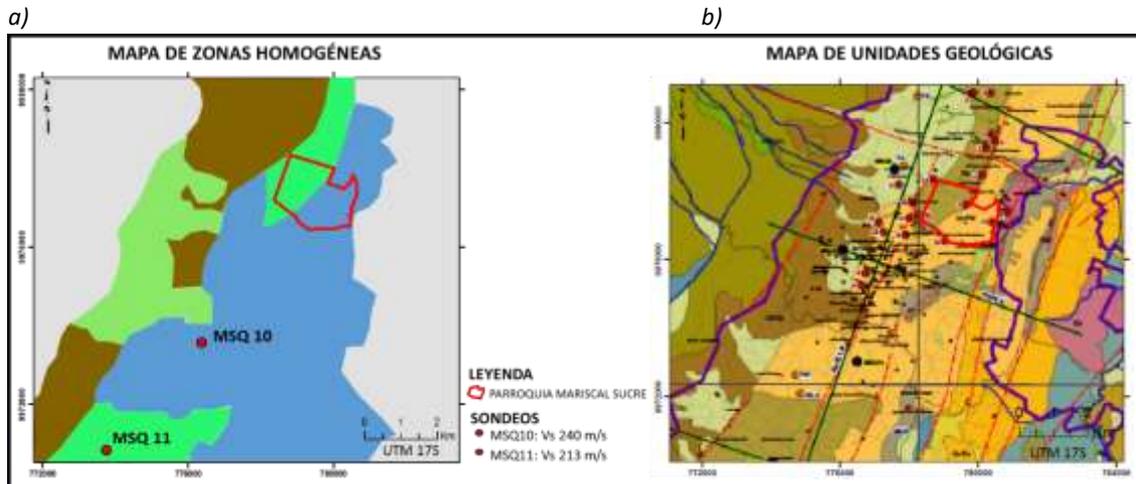
Se ha considerado el trabajo de consultoría realizado por el “Consortio Evaluación de Riesgos Naturales-América Latina”, que, como parte del Programa para la Reducción de Riesgos Urbanos en el Distrito Metropolitano de Quito, ejecuta el proyecto denominado Microzonificación Sísmica del Distrito Metropolitano de Quito. En su reporte final, considerando la información estratigráfica y la delimitación de las formaciones geológicas, llega a determinar zonas de comportamiento homogéneo asociadas a puntos específicos, en los cuales se dispone de información de la velocidad de ondas de cizalla en los 30 m más superficiales, conocida como  $V_{s30}$  (ERN-AL, 2012).

De acuerdo a la delimitación propuesta en ERN-AL (2012) y a la delimitación de unidades geológicas en el área de estudio (Correa, 2011), se pueden distinguir dos zonas con características diferentes (Figura 5.11):

- Zona Este: formada por roca de origen volcánico (Cangahua) sobre material sedimentario denominado Machángara (Qc/PM). Su comportamiento está caracterizado por el sondeo

MSQ10, que presenta una velocidad de ondas en el último tramo  $V_{s30} = 240$  m/s (ERN-AL, 2012).

- Zona Oeste: donde se observa un suelo denominado depósito lagunar de ceniza volcánica (QL) asentado muy probablemente sobre rocas sedimentarias de origen volcánico, cuyo comportamiento está caracterizado por el sondeo MSQ11, presentando una  $V_{s30} = 213$  m/s (ERN-AL, 2012).



**Figura 5.11:** Representación de la Parroquia Mariscal Sucre en: a) Mapa de zonas dinámicamente homogéneas y el sondeo que las caracteriza (tomado de ERN-AL, 2012); b) Mapa de Unidades Geológicas (tomado de Correa, 2011).

En función de la información recopilada y la clasificación establecida en Zhao et al. (2006), las zonas Este y Oeste identificadas en la parroquia Mariscal Sucre presentan un suelo tipo SC III, según la escala definida por Molas y Yamazaki (1995), o su equivalente tipo D, en la clasificación realizada por el National Earthquake Hazards Reduction Program-NEHRP (Zhao et al., 2006).

Con los datos anteriormente estimados se ha procedido a utilizar el modelo de predicción del movimiento de Zhao et al. (2006), con el objetivo de obtener el espectro elástico de demanda para cada centroide propuesto, incluyendo ya el efecto local.

Para la representación del espectro y su posterior uso en el cálculo del riesgo se han obtenido espectros medios para los tres barrios que conforman la parroquia Mariscal Sucre (Tabla 5.5 y Figura 5.12):

**Tabla 5.5:** Valores de aceleración ( $g$ ) que configuran los espectros de respuesta, para el escenario sísmico definido, en los tres barrios de estudio

BARRIOS	PGA	SA0.1	SA0.2	SA0.3	SA0.5	SA0.7	SA1.0	SA1.5	SA2.0
LA COLÓN	0.453	0.745	0.961	1.011	0.872	0.580	0.343	0.208	0.136
MARISCAL SUCRE	0.449	0.741	0.955	1.003	0.864	0.574	0.340	0.206	0.135
LA FLORESTA	0.465	0.762	0.984	1.037	0.899	0.600	0.356	0.216	0.141

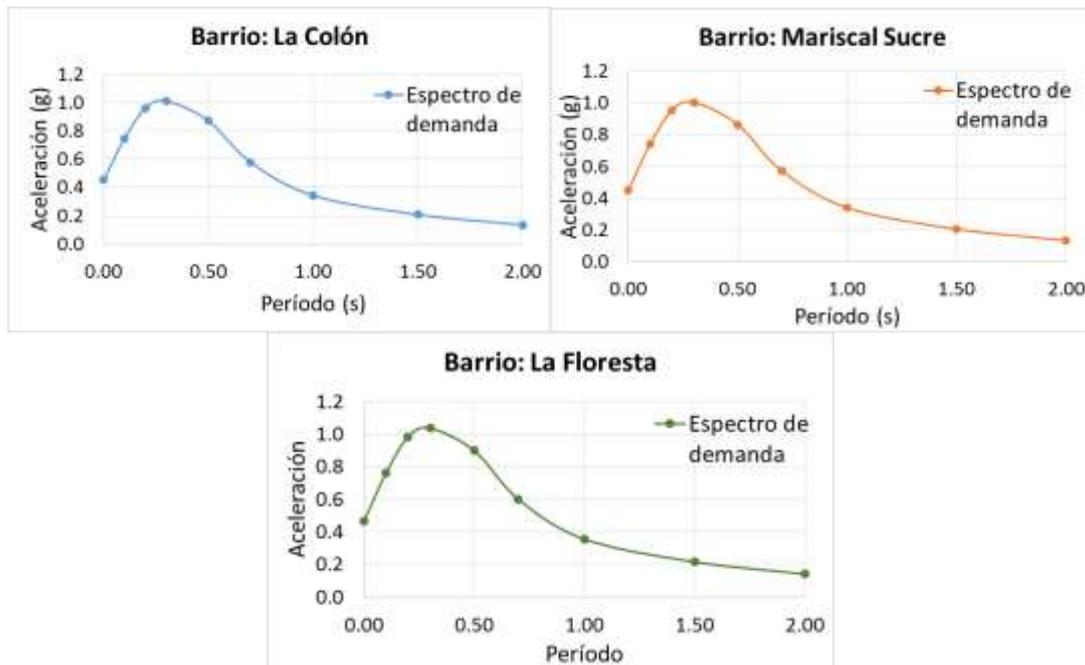


Figura 5.12: Representación de los espectros de respuesta, para el escenario sísmico definido, en los tres barrios objeto de estudio (curvas de demanda).

## 5.4 CLASIFICACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE VULNERABILIDAD.

### 5.4.1 IDENTIFICACIÓN DE TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS.

La vulnerabilidad sísmica de una edificación se expresa por un conjunto de parámetros que permiten predecir su comportamiento ante la ocurrencia de un sismo. Por lo tanto, dependerá de sus características constructivas, de modo que dos edificaciones iguales tendrán la misma vulnerabilidad, aunque estén ubicadas en sitios diferentes.

En el presente estudio, se ha seguido el siguiente esquema de trabajo, con el fin de identificar las tipologías constructivas de interés localizadas en la parroquia Mariscal Sucre (Figura 5.13):



Figura 5.13: Esquema de trabajo para la identificación de tipologías constructivas en Mariscal Sucre.

Para la identificación de las tipologías constructivas presentes en el área de estudio, se han seguido los siguientes pasos:

1. Selección de edificaciones de uso residencial. Se ha integrado la información de la base de datos catastral y la clasificación expuesta en HAZUS (2003), donde se delimitan las edificaciones de uso residencial como: permanente (casas y departamentos) y temporales (hoteles, moteles, y centros de asistencia social). La distribución de estas tipologías se muestra en la Figura 5.14.

Del análisis realizado se ha podido observar que el barrio La Floresta se encuentra constituido principalmente por edificaciones de uso residencial permanente, mientras en los barrios La Colón y principalmente en la Mariscal Sucre se encuentran, además de estructuras residenciales permanentes, una mayor concentración de Hoteles y Hostales.

2. Identificación de las tipologías constructivas predominantes, mediante criterio de juicio de expertos: se han realizado reuniones de trabajo con el Dr. Roberto Aguiar, perteneciente al Centro de Investigaciones de la Universidad de Fuerzas Armadas-ESPE y Vicepresidente del Instituto Panamericano de Historia y Geografía, sede Ecuador; la Ing. Geovana Chávez, responsable de la Unidad Sistema de Información Catastral de la Dirección Metropolitana de Catastro del Ilustre Municipio de Quito y especialista Catastral de la Dirección de Avalúos y Catastros del Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda del Ecuador; en sesiones mantenidas en Quito en los meses de agosto de 2014 y febrero de 2015, y en Madrid en el Grupo de Investigación de Ingeniería Sísmica de la UPM en los meses de octubre de 2014 y marzo de 2015.

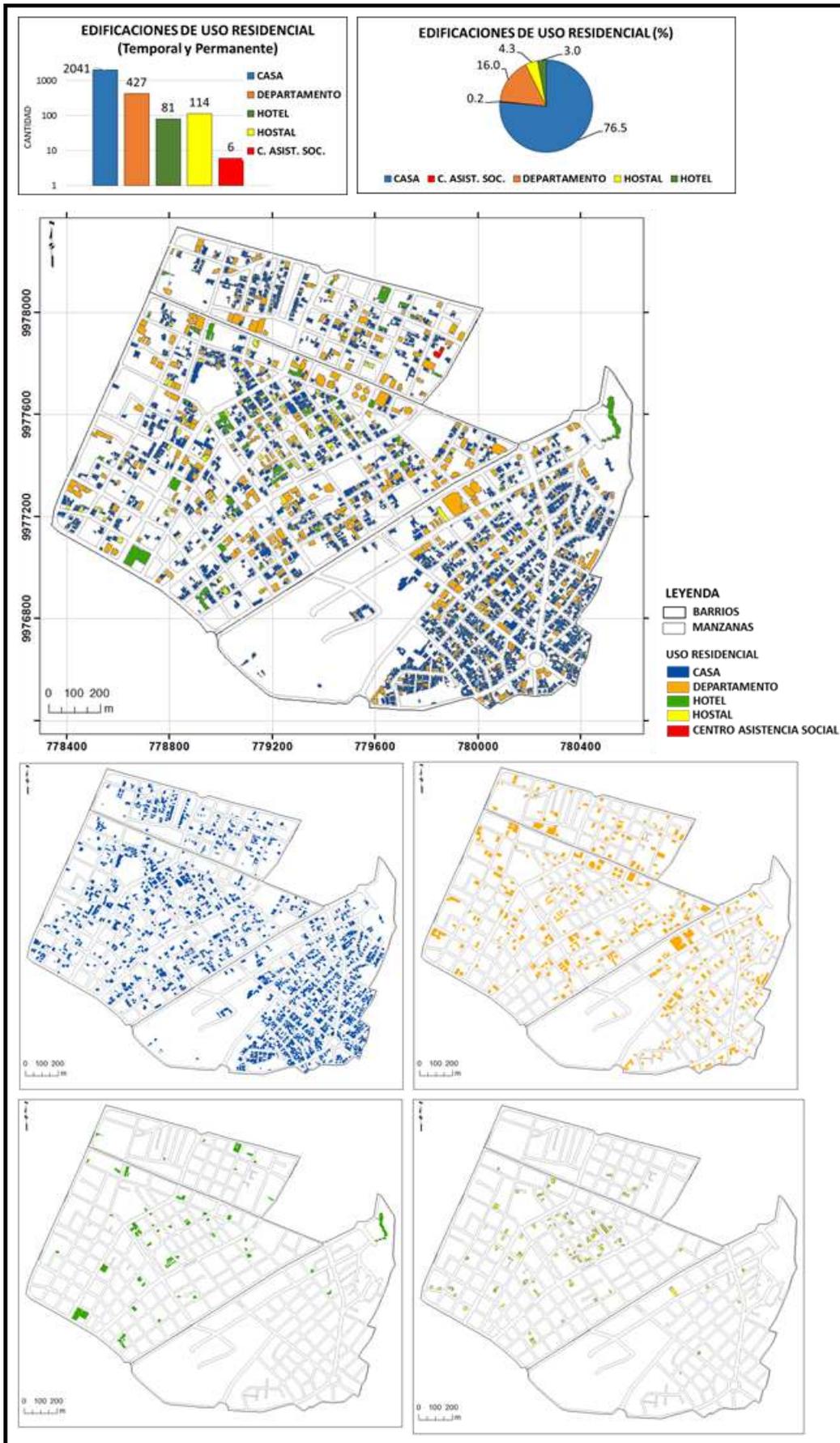


Figura 5.14: Distribución de Edificaciones de uso residencial en la Parroquia Mariscal Sucre.

#### 5.4.2 ASIGNACIÓN DE VULNERABILIDAD.

Una vez identificadas las tipologías constructivas presentes en la zona de estudio, se ha procedido a la asignación de su clase de vulnerabilidad, mediante un proceso estructurado en dos fases que se detallan a continuación.

##### Fase 1: Clasificación inicial.

Se ha adoptado la clasificación propuesta en HAZUS (2003), donde además del análisis de la estructura constructiva, se hace una clasificación según la altura en términos de: Low-Rise (L: entre 1 y 3 pisos), Mid-Rise (M: entre 4 y 7 pisos) y High-Rise (H: igual o mayor a 8 pisos).

Para asignar las clases de HAZUS (2003) a las tipologías del parque inmobiliario, se ha analizado la Información catastral, considerando datos referentes a: tipo de estructura, tipo de mampostería y número de pisos de la edificación. Se procede entonces a relacionar las características de cada tipología con las definidas en Hazus (2003) para las distintas clases de vulnerabilidad.

Se ha efectuado así una primera clasificación para cada tipología definida (Tabla 5.6), que se ha calibrado con salidas de campo realizadas en las sesiones de trabajo enunciadas anteriormente. Un archivo fotográfico, documentando cada clase, se puede encontrar en el Anexo 3.

**Tabla 5.6:** Clasificación de vulnerabilidad adoptada, según HAZUS (2003) sin considerar el nivel de diseño.

No.	VULNERABILIDAD	DESCRIPCIÓN (HAZUS, 2003)	NÚMERO DE PISOS
1	C1L	Estructuras de hormigón armado con capacidad momento.	1 - 3
2	C1M		4 - 7
3	C3H	Edificios de estructura de hormigón con paredes de mampostería sin reforzar.	8 +
4	S1L	Marcos de acero con momento.	1 - 3
5	S1M		4 - 7
6	S3	Marcos de acero liviano.	Todos
7	S4H	Marcos de acero con muros de corte de hormigón vaciado en situ.	8 +
8	URML	Mampostería de muros de carga no reforzada.	1 - 2
9	URMM		3 +
10	W1	Marcos de madera liviana.	1 - 2
11	W2	Marcos de madera de superficie mayor a 465 m <sup>2</sup> .	Todos

##### Fase 2: Clasificación considerando el nivel de diseño.

De manera adicional a la clasificación anterior, HAZUS (2003) realiza una clasificación relacionada con el nivel de diseño, que se basa en el cumplimiento de los códigos de construcción, proponiendo cuatro categorías: PRE, LOW, MED y HIGH.

Para el presente estudio se han considerado el Código Nacional de la Construcción publicado en 1951, la Guía popular de construcciones Sismo-Resistentes que entra en vigencia desde

diciembre de 1976 y el Código Ecuatoriano de la Construcción publicado en 2001. (descritos en el apartado 1.2.1).

De la base de datos catastral se ha tenido en cuenta la información relacionada al año de construcción de la edificación y a su estado de mantenimiento, que corresponde a cuatro categorías: Muy bueno, Bueno, Regular y Malo.

Con los datos anteriores se establecen los siguientes niveles de diseño:

- Pre-código (Pre): edificaciones cuyo año de construcción es anterior a 1951.
- Código bajo (low): edificaciones cuyo año de construcción se encuentra entre 1951 y 1976.
- Código moderado (mod): edificaciones cuyo año de construcción se encuentra entre 1977 y 2001.
- Código alto (high): edificaciones cuyo año de construcción es posterior al 2001.

Para las edificaciones cuyo estado de conservación es regular y malo, se ha aplicado una penalización en su nivel de diseño. Por ejemplo, edificaciones construidas con el código de 1977-2001, cuyo nivel de diseño debería ser moderado (mod), si tienen un estado de conservación malo, se consideran con nivel de diseño bajo (low). La Tabla 5.7 establece los niveles de diseño dependiendo del año y el estado de conservación e incluye las penalizaciones aplicadas.

**Tabla 5.7:** Definición del nivel de diseño.

CÓDIGO	ESTADO DE CONSERVACIÓN	NIVEL DE DISEÑO	
		POR CÓDIGO	PENALIZACIÓN
Anterior 1951	Muy bueno	pre	
	Bueno	pre	
	Regular	pre	
	Malo	pre	
1951-1976	Muy bueno	low	
	Bueno	low	
	Regular		pre
	Malo		pre
1977-2001	Muy bueno	mod	
	Bueno	mod	
	Regular		low
	Malo		low
2002-2014	Muy bueno	high	
	Bueno	high	
	Regular		mod
	Malo		mod

Como resultado final se han identificado 23 clases de vulnerabilidad para las tipologías existentes de uso residencial, mostradas en la Tabla 5.8, donde también se indica el número existente de cada clase en cada barrio y el total en la parroquia.

**Tabla 5.8:** Clases de vulnerabilidad identificadas para el presente estudio.

TIPOLOGÍA	LA COLON	LA FLORESTA	MARISCAL SUCRE	TOTAL
C1L_high	3	24	21	48
C1L_mod	87	522	237	846
C1L_low	78	302	195	575
C1L_pre	1	16	20	37
C1M_high	5	36	10	51
C1M_mod	14	82	61	157
C1M_low	13	23	33	69
C1M_pre	0	1	11	12
C3H_low	31	20	107	158
S1L_high	0	0	1	1
S1M_mod	0	1	0	1
S3_high	2	1	6	9
S3_mod	1	6	12	19
S3_low	1	9	5	15
S4H_high	0	0	1	1
URML_low	48	75	170	293
URML_pre	27	107	180	314
URMM_low	2	9	16	27
URMM_pre	2	3	23	28
W1_low	0	0	1	1
W1_mod	0	4	0	4
W1_pre	0	1	1	2
W2_pre	0	0	1	1
<b>TOTAL</b>	<b>315</b>	<b>1242</b>	<b>1112</b>	<b>2669</b>

### 5.4.3 CURVAS DE CAPACIDAD.

Una vez identificadas las tipologías constructivas y sus clases de vulnerabilidad asociadas, se han asignado las correspondientes curvas de capacidad a cada clase, seleccionando para ello las propuestas por Hazus (2003) (Figuras 5.15-5.25). Dichas curvas representan el comportamiento de la correspondiente clase de vulnerabilidad ante un sismo, y se construyen a partir de tablas donde se presentan los valores de desplazamiento y aceleración correspondientes a los puntos de fluencia y capacidad última, para cada clase de vulnerabilidad.

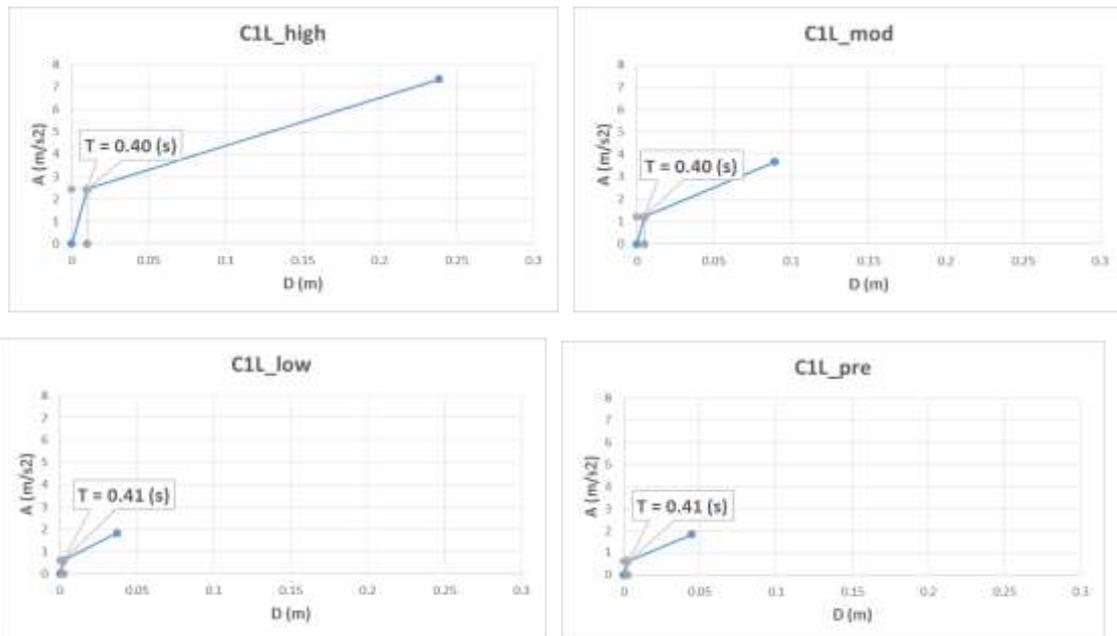
Adicionalmente se ha estimado el período natural para cada clase (Tabla 5.9), considerando la siguiente relación (HAZUS, 2003):

$$T = 2 \pi * (Dy/Ay)^{1/2} \quad (5.1)$$

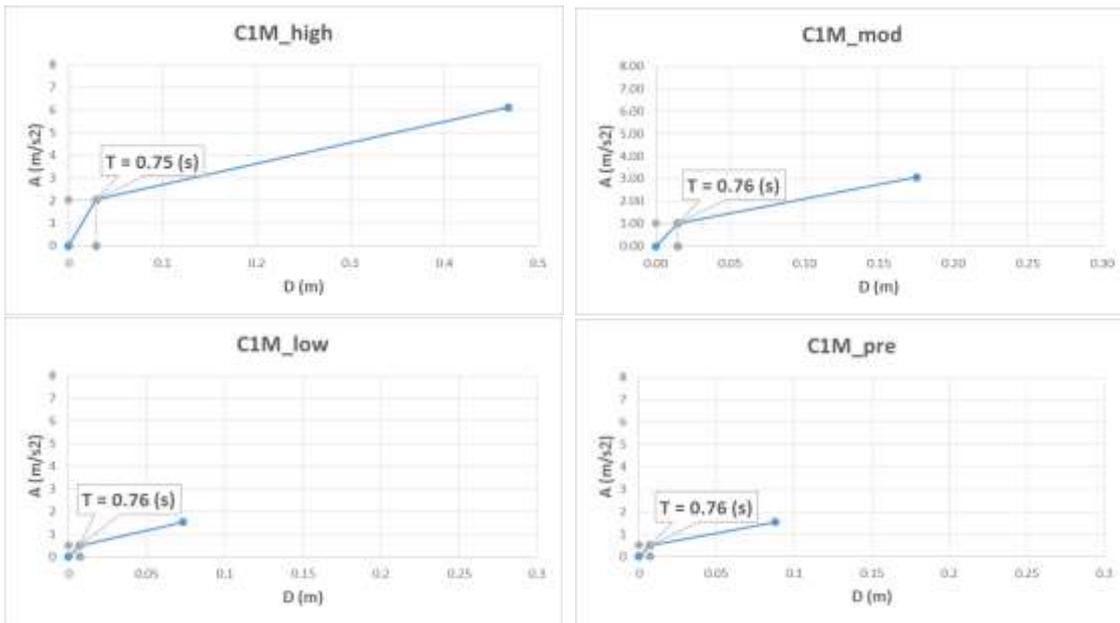
**Tabla 5.9:** Parámetros de las curvas de capacidad para cada clase de vulnerabilidad.

CLASIFICACIÓN HAZUS	Dy (m)	Ay (m/s <sup>2</sup> )	Du (m)	Au (m/s <sup>2</sup> )	PERÍODO T (s)
W1_mod	0.0091	2.94	0.16	8.83	0.35
W1_low	0.0061	1.96	0.11	5.89	0.35
W1_pre	0.0061	1.96	0.11	5.89	0.35
W2_pre	0.0041	0.98	0.06	2.45	0.40
S1L_high	0.0155	2.45	0.37	7.35	0.50
S1M_mod	0.0226	0.77	0.27	2.30	1.08
S3_high	0.0160	3.92	0.25	7.85	0.40
S3_mod	0.0079	1.96	0.10	3.92	0.40
S3_low	0.0041	0.98	0.04	1.96	0.40
S4H_high	0.0886	1.99	0.80	4.48	1.33
URML_low	0.0061	1.96	0.06	3.92	0.35
URML_pre	0.0061	1.96	0.06	3.92	0.35
URMM_low	0.0069	1.09	0.05	2.18	0.50
URMM_pre	0.0069	1.09	0.05	2.18	0.50
C1L_high	0.0099	2.45	0.24	7.35	0.40
C1L_mod	0.0051	1.23	0.09	3.68	0.40
C1L_low	0.0025	0.61	0.04	1.83	0.41
C1L_pre	0.0025	0.61	0.04	1.83	0.41
C1M_high	0.0292	2.04	0.47	6.12	0.75
C1M_mod	0.0147	1.02	0.18	3.06	0.76
C1M_low	0.0074	0.51	0.07	1.53	0.76
C1M_pre	0.0074	0.51	0.09	1.53	0.76
C3H_low	0.0188	0.62	0.10	1.40	1.10

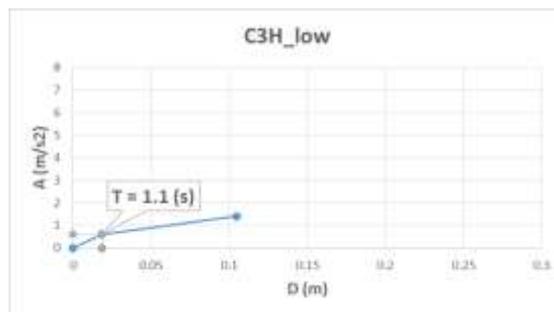
Notación: Dy: desplazamiento en el punto de fluencia; Ay: aceleración en el punto de fluencia; Du: desplazamiento último; Au: Aceleración última.



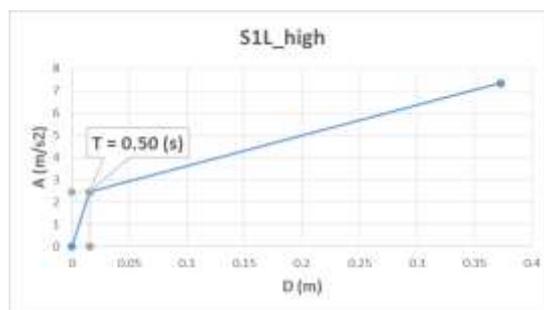
**Figura 5.15:** Curvas de capacidad desarrolladas en HAZUS (2003) para estructuras de hormigón armado C1, de altura L (1-3 pisos) y nivel de diseño \_high, \_mod, \_low y \_pre.



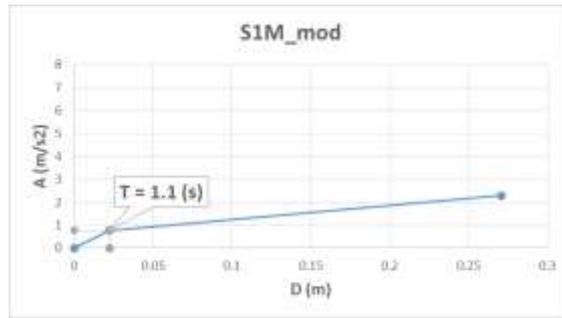
**Figura 5.16:** Curvas de capacidad desarrolladas en HAZUS (2003) para estructuras de hormigón armado C1, de altura M (4-7 pisos) y nivel de diseño *\_high*, *\_mod*, *\_low* y *\_pre*.



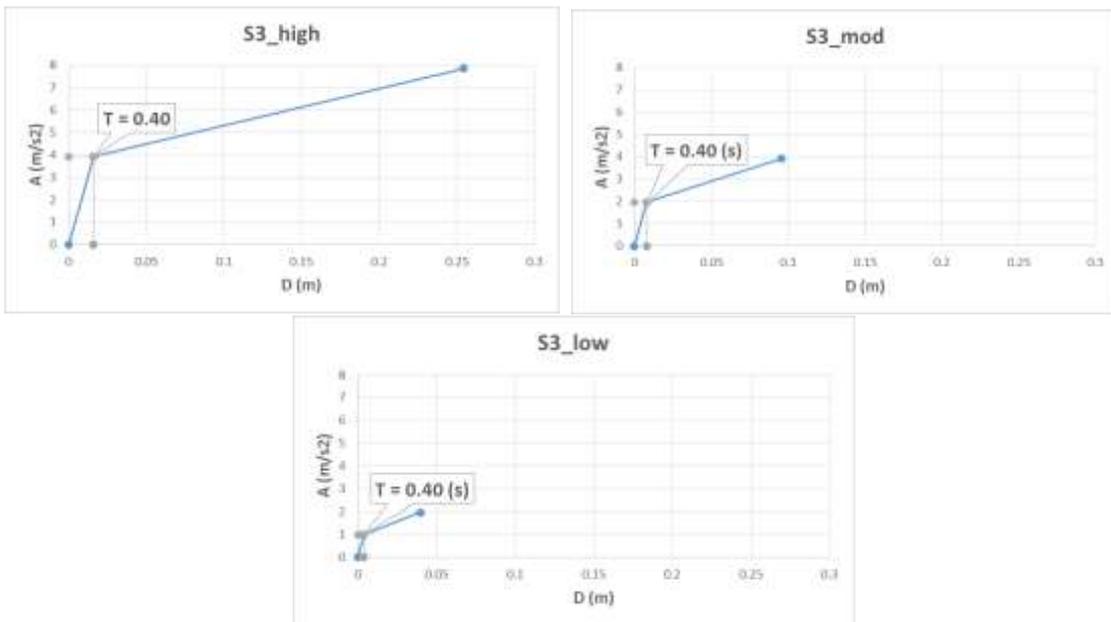
**Figura 5.17:** Curvas de capacidad desarrolladas en HAZUS (2003) para estructuras de hormigón armado C3, de altura H (4-7 pisos) y nivel de diseño *\_low*.



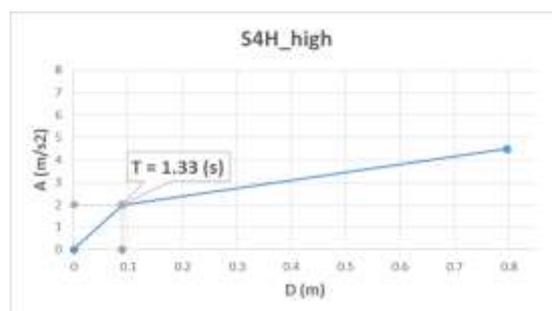
**Figura 5.18:** Curva de capacidad desarrollada en HAZUS (2003) para estructuras de acero S1, de altura L (1-3 pisos) y nivel de diseño *\_high*.



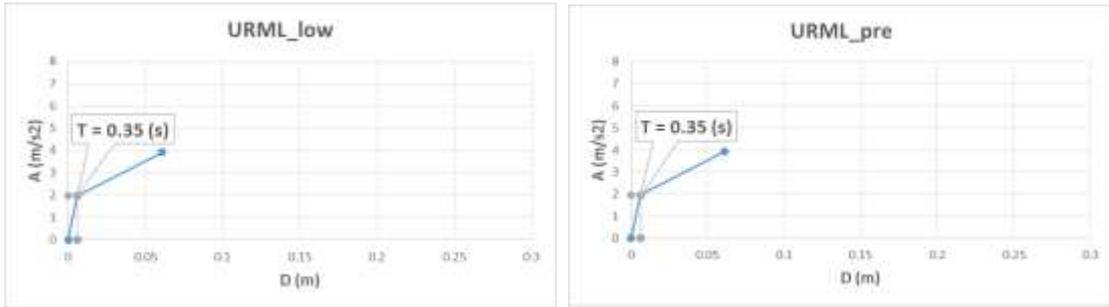
**Figura 5.19:** Curva de capacidad desarrollada en HAZUS (2003) para estructuras de acero S1, de altura M (4-7 pisos) y nivel de diseño \_high y \_mod.



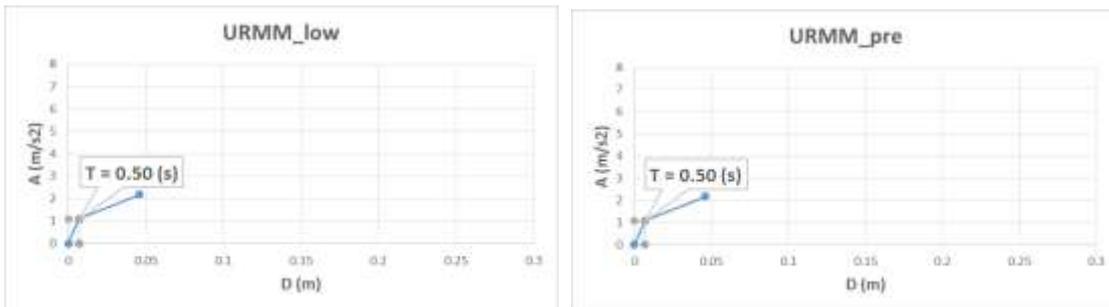
**Figura 5.20:** Curvas de capacidad desarrolladas en HAZUS (2003) para estructuras de acero S3, para todas las alturas y nivel de diseño \_high, \_mod, \_low y \_pre.



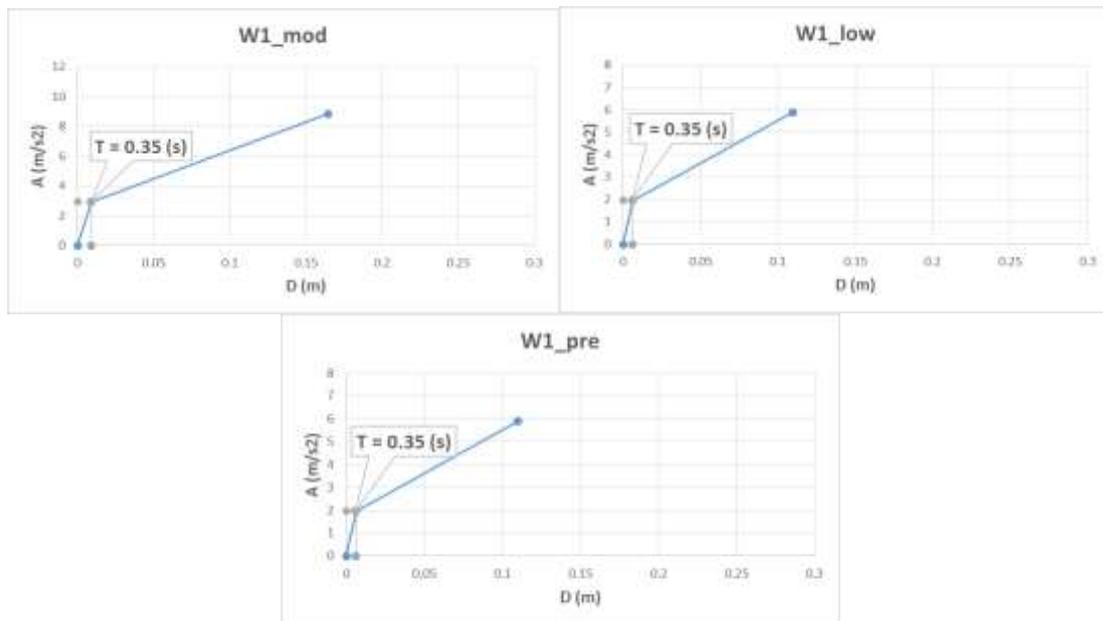
**Figura 5.21:** Curva de capacidad desarrollada en HAZUS (2003) para estructuras de acero S4, de altura H ( $\geq 8$  pisos) y nivel de diseño \_high.



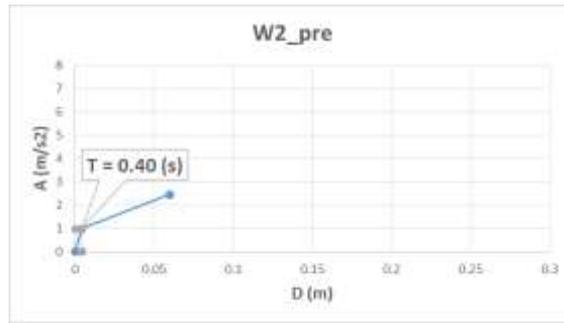
**Figura 5.22:** Curvas de capacidad desarrolladas en HAZUS (2003) para estructuras de mampostería no reforzada (URM), de altura L (1-2 pisos) y nivel de diseño *\_low* y *\_pre*.



**Figura 5.23:** Curvas de capacidad desarrollado en HAZUS (2003) para estructuras de mampostería no reforzada (URM), de altura M ( $\geq 3$  pisos) y nivel de diseño *\_low* y *\_pre*.



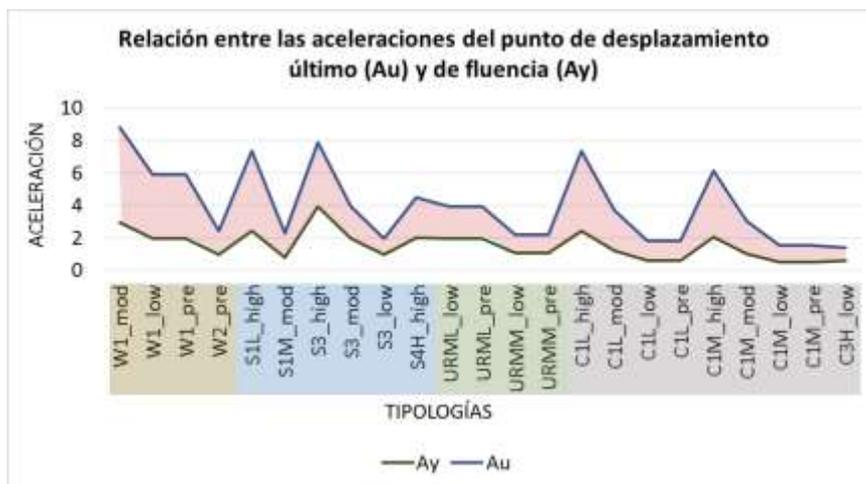
**Figura 5.24:** Curvas de capacidad desarrolladas en HAZUS (2003) para estructuras de madera W1, de altura de 1-2 pisos y nivel de diseño *\_high*, *\_mod*, *\_low* y *\_pre*.



**Figura 5.25:** Curva de capacidad desarrollada en HAZUS (2003) para estructuras de madera W2, para todas las alturas y nivel de diseño \_pre.

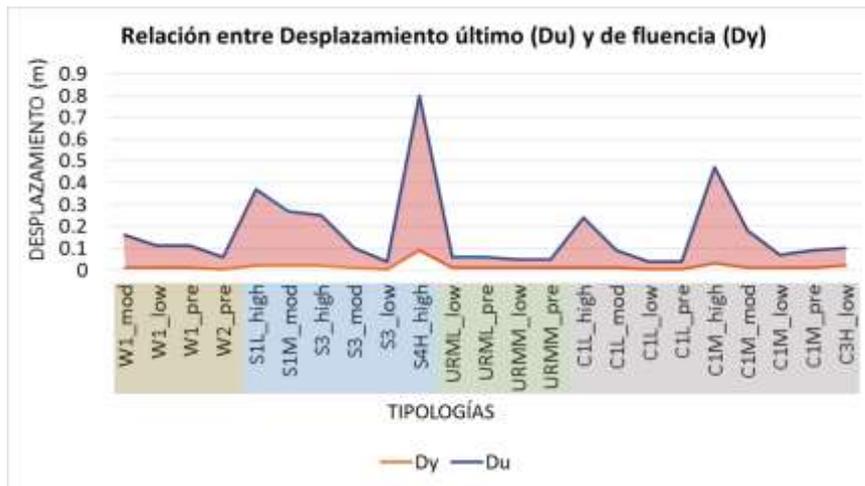
De la representación de las aceleraciones en los puntos de desplazamiento último ( $A_u$ ) y de fluencia ( $A_y$ ), se observa que las estructuras de hormigón armado con nivel de diseño bajo y pre código, las estructuras con marcos de madera del tipo W2 y las estructuras con marcos de acero del tipo S1M\_mod y S3\_low, alcanzan su estado plástico a menores aceleraciones; mientras las estructuras de hormigón armado de nivel de diseño alto, las estructuras de marco de acero S3 y S1L de nivel de diseño alto y de marcos de madera W1\_mod, requieren mayores valores de aceleración para alcanzar su punto de desplazamiento último.

Finalmente, las mayores diferencias entre las aceleraciones  $A_u$  y  $A_y$  se presentan en las tipologías W1\_mod, S1L\_high y C1L\_high (Figura 5.26).



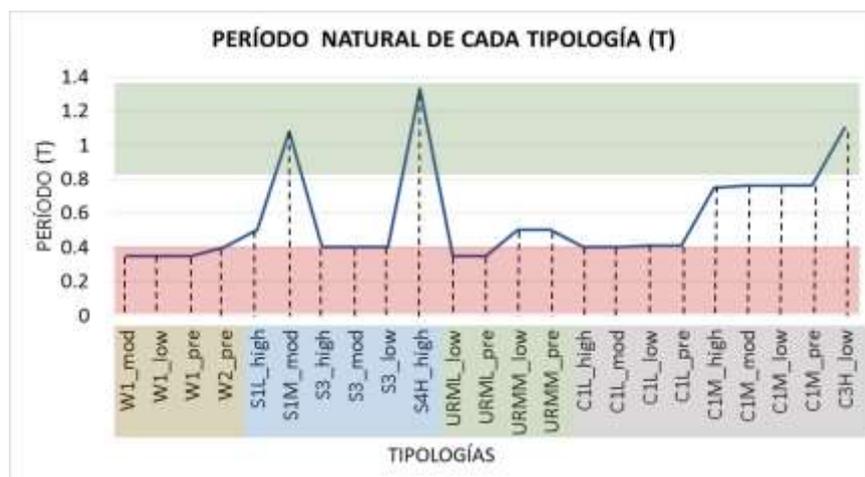
**Figura 5.26:** Representación de las aceleraciones  $A_u$  y  $A_y$  para las tipologías del estudio.

De igual forma se observa que las tipologías de nivel de diseño alto presentan los mayores valores de desplazamiento último ( $D_u$ ), disminuyendo a medida que disminuye el nivel de diseño; encontrando las mayores amplitudes entre los desplazamientos  $D_u$  y  $D_y$  para las estructuras de nivel de diseño alto (Figura 5.27).



**Figura 5.27:** Relación entre los desplazamientos últimos y de fluencia de cada tipología.

De la estimación realizada para el período natural (T), los menores valores se observan para estructuras de madera, estructuras de acero del tipo S3, mampostería no reforzada de baja altura y estructuras de hormigón armado del tipo C1 de baja altura (Figura 5.28).



**Figura 5.28:** Representación del período natural por tipología constructiva.

#### 5.4.4 APLICACIÓN DEL MÉTODO DE COEFICIENTE DE DESPLAZAMIENTO MEJORADO.

Partiendo de la clasificación de vulnerabilidad anterior, el posterior cálculo del riesgo requiere estimar la probabilidad de que una determinada tipología alcance o supere cada uno de los grados de daño predefinidos ante la acción sísmica representativa del escenario de peligrosidad obtenido. Para ello se aplicará el Método de Coeficiente de Desplazamiento Mejorado (IDCM) propuesto en el reporte FEMA 440 (2005), descrito en el apartado 2.2. Con este método se estima el Desplazamiento Global Máximo ( $\delta$ ), que representa la suma de desplazamientos elástico más inelástico, y que posteriormente se introducirá en las curvas de fragilidad.

El procedimiento que se ha seguido es el siguiente:

1. A partir del período efectivo (T), que representa la pérdida de rigidez de la estructura en la transición de un comportamiento elástico a inelástico, se ha determinado la aceleración espectral ( $S_a$ ), en el espectro de demanda medio estimado para cada barrio (Figuras 2.19 y

5.12). Esta aceleración corresponde a la demanda de aceleración espectral ( $Sa^{(cl)}$ ) del sistema lineal equivalente de un grado de libertad (SDOF, del inglés Single Degree Of Freedom).

- Para estimar la demanda máxima de desplazamiento espectral ( $Sd^{(cl)}$ ), del sistema lineal equivalente de un grado de libertad, aplicamos la siguiente relación (FEMA 440, 2005):

$$Sd^{(cl)} = T^2 / 4\pi^2 Sa^{(cl)} \quad (5.2)$$

donde,

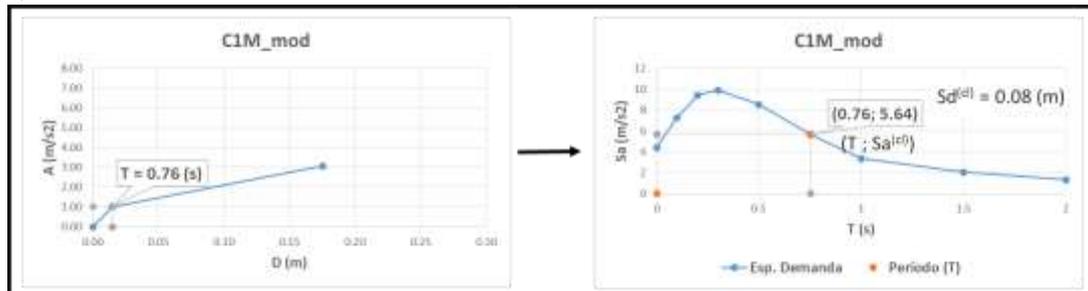
$Sd^{(cl)}$ : demanda máxima de desplazamiento espectral del sistema lineal SDOF.

T: Período fundamental.

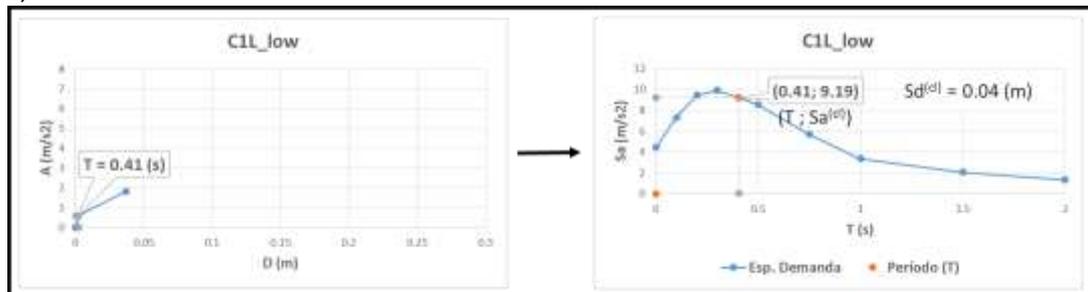
$Sa^{(cl)}$ : demanda de aceleración espectral del sistema lineal SDOF.

A modo de ejemplo, la representación gráfica de la demanda de aceleración espectral del sistema lineal SDOF ( $Sa^{(cl)}$ ) y la demanda máxima de desplazamiento espectral del sistema lineal SDOF ( $Sd^{(cl)}$ ) de las tipologías C1M\_mod y C1L\_low del Barrio la Colón se presentan en la Figura 5.29. Para el resto de tipologías y barrios las correspondientes figuras se incluyen en el Anexo 4.

a)



b)



**Figura 5.29:** Representación de las curvas de capacidad y demanda para las tipologías a) C1M\_mod y b) C1L\_low, del Barrio la Colón.

- Para estimar la demanda de desplazamiento global ( $\delta$ ), que es el desplazamiento objeto y corresponde el desplazamiento a nivel del techo, se ha modificado la respuesta elástica lineal del sistema equivalente de un grado de libertad (desplazamiento espectral pico) ( $Sd^{(cl)}$ ), multiplicándola por coeficientes que cuantifican la tasa de desplazamiento máximo y el ajuste por degradación cíclica de cada estructura (FEMA 440, 2005). Las relaciones utilizadas corresponden a las ecuaciones (2.11), (2.12), (2.13) y (2.14), descritas en el apartado 2.2 Riesgo Sísmico, de este estudio.

Los valores de los distintos parámetros obtenidos por el método de Coeficiente de Desplazamiento para las tipologías pertenecientes a los barrios La Colón, La Floresta y Mariscal Sucre se presentan en las tablas 5.10, 5.11 y 5.12 respectivamente.

**Tabla 5.10:** Valores deducidos por el Método de Coeficiente de Desplazamiento para las diferentes clases de vulnerabilidad en el barrio de Colón.

TIP. HAZUS	PERÍODO (T)	Sa <sup>(cl)</sup> (m/s <sup>2</sup> )	Ay (m/s <sup>2</sup> )	Sd <sup>(cl)</sup> (m)	R	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	δ (cm)
S3_high	0.40	9.225	3.92	0.038	2.351	1.140	1.014	4.3
S3_mod	0.40	9.247	1.96	0.037	4.713	1.391	1.109	5.7
S3_low	0.40	9.204	0.98	0.038	9.382	1.854	1.537	10.9
URML_low	0.35	9.573	1.96	0.030	4.879	1.527	1.153	5.2
URML_pre	0.35	9.573	1.96	0.030	4.879	1.527	1.153	5.2
URMM_low	0.50	8.562	1.09	0.054	7.863	1.460	1.237	9.7
URMM_pre	0.50	8.562	1.09	0.054	7.863	1.460	1.237	9.7
C1L_high	0.40	9.238	2.45	0.037	3.767	1.289	1.060	5.1
C1L_mod	0.40	9.204	1.23	0.038	7.506	1.663	1.323	8.4
C1L_low	0.41	9.193	0.61	0.038	15.114	2.427	2.510	23.4
C1L_pre	0.41	9.193	0.61	0.038	15.114	2.427	2.510	23.4
C1M_high	0.75	5.674	2.04	0.081	2.781	1.053	1.007	8.6
C1M_mod	0.76	5.643	1.02	0.081	5.532	1.132	1.045	9.6
C1M_low	0.76	5.643	0.51	0.081	11.063	1.294	1.222	12.9
C3H_low	1.10	3.115	0.62	0.095	5.040	1.056	1.017	10.2

**Tabla 5.11:** Valores deducidos por el Método de Coeficiente de Desplazamiento para las diferentes clases de vulnerabilidad en el barrio de La Floresta.

TIP. HAZUS	PERÍODO (T)	Sa <sup>(cl)</sup> (m/s <sup>2</sup> )	Ay (m/s <sup>2</sup> )	Sd <sup>(cl)</sup> (m)	R	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	δ (cm)
W1_mod	0.35	9.834	2.94	0.031	3.342	1.318	1.056	4.3
W1_pre	0.35	9.834	1.96	0.031	5.012	1.545	1.164	5.5
S1M_mod	1.08	3.269	0.77	0.097	4.272	1.047	1.011	10.2
S3_high	0.40	9.488	3.92	0.039	2.418	1.147	1.016	4.5
S3_mod	0.40	9.510	1.96	0.038	4.847	1.405	1.117	6.0
S3_low	0.40	9.467	0.98	0.039	9.650	1.882	1.572	11.6
S4H_high	1.33	2.594	1.99	0.115	1.303	1.003	1.000	11.6
URML_low	0.35	9.834	1.96	0.031	5.012	1.545	1.164	5.5
URML_pre	0.35	9.834	1.96	0.031	5.012	1.545	1.164	5.5
URMM_low	0.50	8.828	1.09	0.056	8.107	1.476	1.254	10.3
URMM_pre	0.50	8.828	1.09	0.056	8.107	1.476	1.254	10.3
C1L_high	0.40	9.501	2.45	0.038	3.874	1.300	1.065	5.3
C1L_mod	0.40	9.467	1.23	0.039	7.720	1.685	1.345	8.9
C1L_low	0.41	9.456	0.61	0.039	15.547	2.471	2.604	25.4
C1M_high	0.75	5.873	2.04	0.084	2.878	1.055	1.008	8.9
C1M_mod	0.76	5.841	1.02	0.084	5.726	1.138	1.049	10.1
C1M_low	0.76	5.841	0.51	0.084	11.451	1.306	1.240	13.6
C1M_pre	0.76	5.841	0.51	0.084	11.451	1.306	1.240	13.6
C3H_low	1.10	3.225	0.62	0.098	5.219	1.059	1.019	10.6

**Tabla 5.12:** Valores deducidos por el Método de coeficiente de Desplazamiento para las diferentes clases de vulnerabilidad en el barrio de Mariscal Sucre.

TIP. HAZUS	Período (T)	Sa <sup>(cl)</sup> (m/s <sup>2</sup> )	Ay (m/s <sup>2</sup> )	Sd <sup>(cl)</sup> (m)	R	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	δ (cm)
W1_low	0.35	9.500	1.96	0.030	4.842	1.522	1.150	5.2
W1_pre	0.35	9.500	1.96	0.030	4.842	1.522	1.150	5.2
W2_pre	0.40	9.131	0.98	0.038	9.307	1.847	1.527	10.7
S1L_high	0.50	8.483	2.45	0.054	3.459	1.164	1.030	6.4
S3_high	0.40	9.152	3.92	0.037	2.332	1.138	1.014	4.3
S3_mod	0.40	9.174	1.96	0.037	4.676	1.387	1.107	5.6
S3_low	0.40	9.131	0.98	0.038	9.307	1.847	1.527	10.7
S4H_high	1.33	2.479	1.99	0.110	1.245	1.002	1.000	11.1
URML_low	0.35	9.500	1.96	0.030	4.842	1.522	1.150	5.2
URML_pre	0.35	9.500	1.96	0.030	4.842	1.522	1.150	5.2
URMM_low	0.50	8.489	1.09	0.053	7.796	1.456	1.232	9.6
URMM_pre	0.50	8.489	1.09	0.053	7.796	1.456	1.232	9.6
C1L_high	0.40	9.165	2.45	0.037	3.737	1.286	1.059	5.0
C1L_mod	0.40	9.131	1.23	0.038	7.446	1.657	1.318	8.3
C1L_low	0.41	9.120	0.61	0.038	14.994	2.415	2.485	22.8
C1L_pre	0.41	9.120	0.61	0.038	14.994	2.415	2.485	22.8
C1M_high	0.75	5.619	2.04	0.080	2.754	1.052	1.007	8.5
C1M_mod	0.76	5.589	1.02	0.081	5.478	1.131	1.044	9.5
C1M_low	0.76	5.589	0.51	0.081	10.956	1.291	1.217	12.7
C1M_pre	0.76	5.589	0.51	0.081	10.956	1.291	1.217	12.7
C3H_low	1.10	3.085	0.62	0.094	4.991	1.055	1.017	10.1

#### 5.4.5 CURVAS DE FRAGILIDAD.

Para el posterior cálculo del daño esperado, a partir de los parámetros obtenidos anteriormente, para cada clase de vulnerabilidad y nivel de la acción sísmica, se requiere disponer de curvas de fragilidad. Se utilizan para ello las propuestas en HAZUS (2003), cuyos parámetros característicos se presentan en la Tabla 5.13.

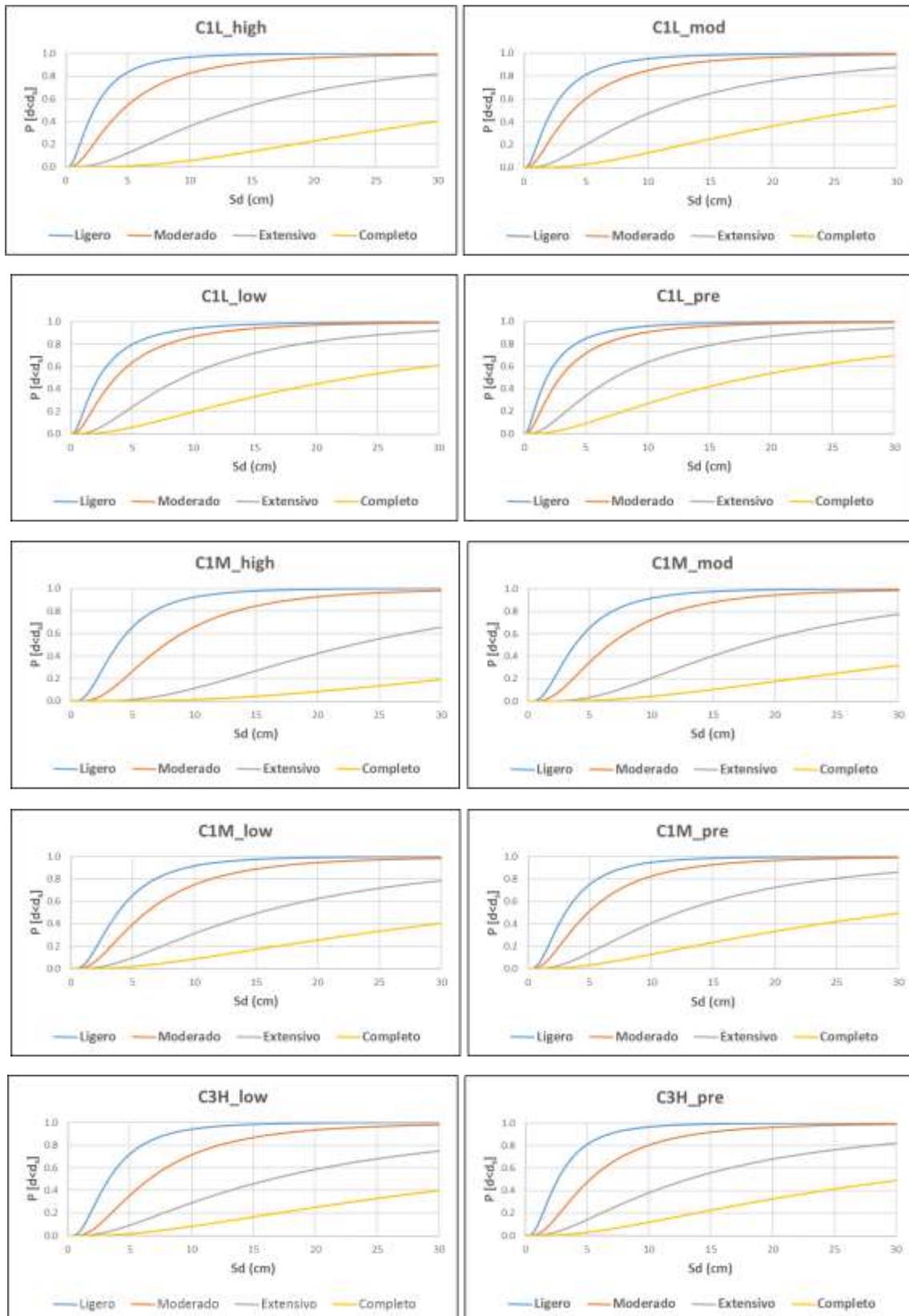
Se adopta también la escala propuesta en HAZUS (2003), que establece la siguiente definición:

- Nulo: sin daños.
- Leve: intensidad de daño insignificante a ligero.
- Moderado: daño estructural ligero y no estructural fuerte.
- Extenso: daño estructural moderado y no estructural fuerte.
- Completo: daño estructural fuerte y no estructural muy fuerte.

**Tabla 5.13:** Parámetros de las curvas de fragilidad (HAZUS, 2003).

TIP. HAZUS	Sd (slight) (cm)	Beta (slight)	Sd (moderate) (cm)	Beta (moderate)	Sd (extensive) (cm)	Beta (extensive)	Sd (complete) (cm)	Beta (complete)
W1_mod	1.27	0.84	3.18	0.86	9.80	0.89	24.00	1.04
W1_low	1.27	0.93	3.18	0.98	9.80	1.02	24.00	0.99
W1_pre	1.02	1.01	2.54	1.05	7.85	1.07	19.20	1.06
W2_pre	1.75	1.04	4.34	0.97	13.44	0.90	32.92	0.99
S1L_high	3.30	0.80	6.58	0.76	16.46	0.69	43.89	0.72
S1M_mod	5.49	0.65	9.50	0.68	21.49	0.69	54.86	0.87
S3_high	1.37	0.81	2.74	0.82	8.23	0.91	24.00	0.90
S3_mod	1.37	0.88	2.39	0.92	6.40	0.97	18.01	0.89
S3_low	1.37	0.98	2.21	0.99	5.51	1.01	15.01	0.90
S4H_high	5.72	0.64	11.40	0.66	34.24	0.69	99.85	0.77
URML_low	1.04	0.99	2.06	1.05	5.16	1.10	12.01	1.08
URML_pre	0.81	1.15	1.65	1.19	4.11	1.20	9.60	1.18
URMM_low	1.60	0.91	3.20	0.92	8.00	0.87	18.67	0.91
URMM_pre	1.27	0.99	2.57	0.97	6.40	0.90	14.94	0.88
C1L_high	2.29	0.81	4.57	0.84	13.72	0.86	36.58	0.81
C1L_mod	2.29	0.89	3.96	0.90	10.67	0.90	27.43	0.89
C1L_low	2.29	0.95	3.66	0.91	9.14	0.85	22.86	0.97
C1L_pre	1.83	0.98	2.92	0.94	7.32	0.90	18.29	0.97
C1M_high	3.81	0.68	7.62	0.67	22.86	0.68	60.96	0.81
C1M_mod	3.81	0.70	6.60	0.70	17.78	0.70	45.72	0.89
C1M_low	3.81	0.70	6.10	0.74	15.24	0.86	38.10	0.98
C1M_pre	3.05	0.73	4.88	0.77	12.19	0.83	30.48	0.98
C3H_low	3.30	0.71	6.58	0.74	16.46	0.90	38.40	0.97

En la Figura 5.30 se muestran las curvas de fragilidad para las tipologías de hormigón armado. Curvas similares para el resto de tipologías se muestran en el Anexo 5.

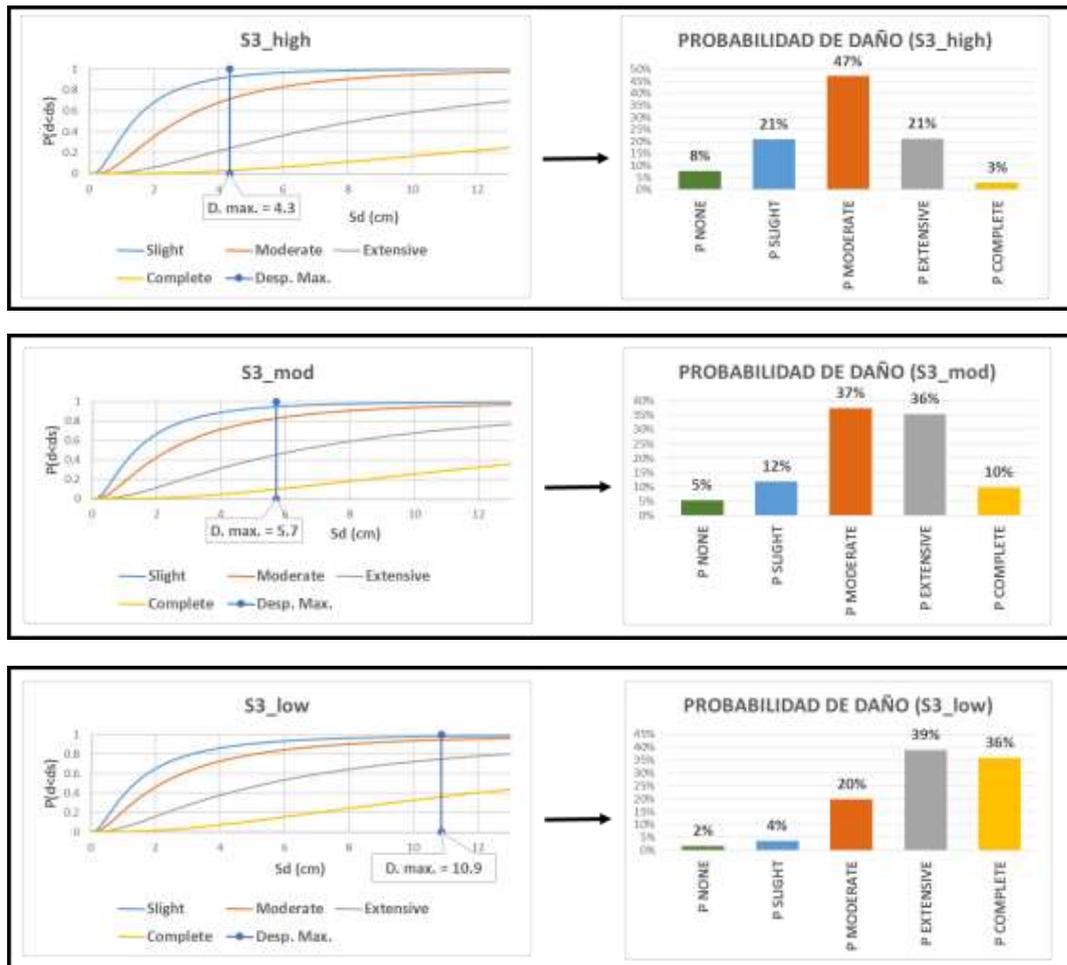


**Figura 5.30:** Curvas de fragilidad para las tipologías de Hormigón Armado

### 5.4.6 ESTIMACIÓN DE LAS PROBABILIDADES DE DAÑO.

Para estimar la probabilidad de que cada una de las tipologías constructivas alcancen o excedan un estado de daño como consecuencia de la acción sísmica para el escenario definido, se han relacionado las demandas de desplazamiento global ( $\delta$ ) obtenidas en el apartado 5.4.4, con las curvas de fragilidad especificadas en el apartado 5.4.5.

En la Figura 5.31 se observan los resultados de esta relación para las tipologías de marcos de acero liviano (S3) del barrio La Colón. La representación de la totalidad de las estructuras en sus respectivos barrios se incluye en el Anexo 5.



**Figura 5.31:** Estimación de la probabilidad de daño para las estructuras de acero del barrio La Colón. Notación: None, Ninguno; Slight, Leve; Moderate, Moderado; Extensive, Extenso y Complete, Completo.

En las Tablas 5.14, 5.15 y 516, se presentan las probabilidades de alcanzar o exceder cada estado de daño en términos de porcentaje para las clases de vulnerabilidad definidas agrupadas por barrios, mostrando en **negrita** los valores más altos.

**Tabla 5.14:** Probabilidades de alcanzar o exceder cada estado de daño para cada clase de vulnerabilidad en el barrio La Colón.

BARRIO / TIPOLOGÍA	ESTADOS DE DAÑO				
	NINGUNO	LIGERO	MODERADO	EXTENSO	COMPLETO
<b>LA COLÓN.</b>					
C1L_high	16%	29%	<b>43%</b>	12%	1%
C1L_mod	7%	13%	<b>40%</b>	30%	9%
C1L_low	1%	1%	11%	36%	<b>51%</b>
C1L_pre	0%	1%	8%	30%	<b>60%</b>
C1M_high	12%	31%	<b>50%</b>	7%	1%
C1M_mod	9%	20%	<b>51%</b>	15%	4%
C1M_low	4%	11%	<b>42%</b>	29%	13%
C3H_low	6%	22%	<b>43%</b>	21%	9%
S3_high	8%	21%	<b>47%</b>	21%	3%
S3_mod	5%	12%	<b>37%</b>	36%	10%
S3_low	2%	4%	20%	<b>39%</b>	36%
URML_low	5%	14%	<b>31%</b>	28%	22%
URML_pre	5%	11%	25%	28%	<b>30%</b>
URMM_low	2%	9%	30%	<b>35%</b>	24%
URMM_pre	2%	6%	24%	<b>37%</b>	31%

**Tabla 5.15:** Probabilidades de alcanzar o exceder cada estado de daño para cada clase de vulnerabilidad en el barrio Mariscal Sucre.

BARRIO / TIPOLOGÍA	ESTADOS DE DAÑO				
	NINGUNO	LIGERO	MODERADO	EXTENSO	COMPLETO
<b>MARISCAL SUCRE.</b>					
C1L_high	16%	29%	<b>42%</b>	12%	1%
C1L_mod	7%	13%	<b>40%</b>	30%	9%
C1L_low	1%	1%	12%	36%	<b>50%</b>
C1L_pre	0%	1%	9%	31%	<b>59%</b>
C1M_high	12%	32%	<b>49%</b>	7%	1%
C1M_mod	10%	21%	<b>51%</b>	15%	4%
C1M_low	4%	12%	<b>42%</b>	28%	13%
C1M_pre	3%	8%	<b>37%</b>	33%	19%
C3H_low	6%	22%	<b>42%</b>	21%	8%
S1L_high	20%	31%	<b>40%</b>	8%	0%
S3_high	8%	21%	<b>47%</b>	21%	3%
S3_mod	5%	12%	<b>38%</b>	35%	10%
S3_low	2%	4%	20%	<b>39%</b>	35%
S4H_high	15%	37%	<b>43%</b>	5%	0%
URML_low	5%	14%	<b>31%</b>	28%	22%
URML_pre	5%	11%	26%	28%	<b>30%</b>
URMM_low	2%	9%	30%	<b>35%</b>	23%
URMM_pre	2%	7%	24%	<b>37%</b>	31%
W1_low	7%	24%	<b>43%</b>	20%	6%
W1_pre	5%	20%	<b>40%</b>	24%	11%
W2_pre	4%	14%	<b>42%</b>	27%	13%

**Tabla 5.16:** Probabilidades de alcanzar o exceder cada estado de daño para cada clase de vulnerabilidad en el barrio La Floresta.

BARRIO / TIPOLOGÍA	ESTADOS DE DAÑO				
	NINGUNO	LIGERO	MODERADO	EXTENSO	COMPLETO
<b>LA FLORESTA.</b>					
C1L_high	15%	28%	<b>44%</b>	13%	1%
C1L_mod	6%	12%	<b>40%</b>	32%	10%
C1L_low	1%	1%	10%	34%	<b>54%</b>
C1L_pre	0%	1%	7%	28%	<b>63%</b>
C1M_high	10%	30%	<b>51%</b>	7%	1%
C1M_mod	8%	19%	<b>52%</b>	16%	4%
C1M_low	3%	10%	<b>41%</b>	30%	15%
C1M_pre	2%	7%	<b>36%</b>	35%	21%
C3H_low	5%	21%	<b>43%</b>	22%	9%
S1M_mod	17%	29%	<b>40%</b>	11%	3%
S3_high	7%	20%	<b>47%</b>	22%	3%
S3_mod	5%	11%	<b>37%</b>	36%	11%
S3_low	1%	3%	18%	38%	<b>39%</b>
URML_low	5%	13%	<b>30%</b>	29%	23%
URML_pre	5%	11%	25%	28%	<b>32%</b>
URMM_low	2%	8%	28%	<b>36%</b>	26%
URMM_pre	2%	6%	22%	<b>37%</b>	34%
W1_mod	8%	29%	<b>46%</b>	13%	5%
W1_pre	5%	18%	<b>40%</b>	25%	12%

De las estimaciones obtenidas se ha observado que las mayores probabilidades de alcanzar o superar un cierto estado de daño, para la acción sísmica definida, corresponden a daño moderado, siendo más bajas las de daño extenso y completo (Figuras 5.32, 5.33 y 5.34).

#### 5.4.7 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE DAÑO OBTENIDOS

Se observa que las tipologías de hormigón armado, del tipo C1L\_pre, presentan una mayor probabilidad de alcanzar el estado de daño completo, en comparación con las estructuras de baja altura e igual nivel de diseño (W1\_pre, W2\_pre y URML\_pre). Esto se debería a que la clase C1L\_pre, necesita menores valores de aceleración en su punto de fluencia ( $A_y$ ), (para el paso de su estado elástico a plástico). Por lo tanto, su tasa de demanda de resistencia elástica con respecto a la capacidad de resistencia calculada ( $R$ ), presenta un valor mayor, lo que influye en los valores estimados para los coeficientes C1 y C2 que modifican la demanda de desplazamiento objeto ( $S_d^{cl}$ ), alcanzando finalmente la tipología C1L\_pre un desplazamiento global ( $\delta$ ) mayor (Tablas 5.10, 5.11 y 5.12).

Igual razonamiento se aplica para las estructuras C1L\_low en comparación con las tipologías W1\_low, S3\_low y URML\_low, siendo estas últimas las que tienen una menor probabilidad de alcanzar o exceder un estado de daño completo.

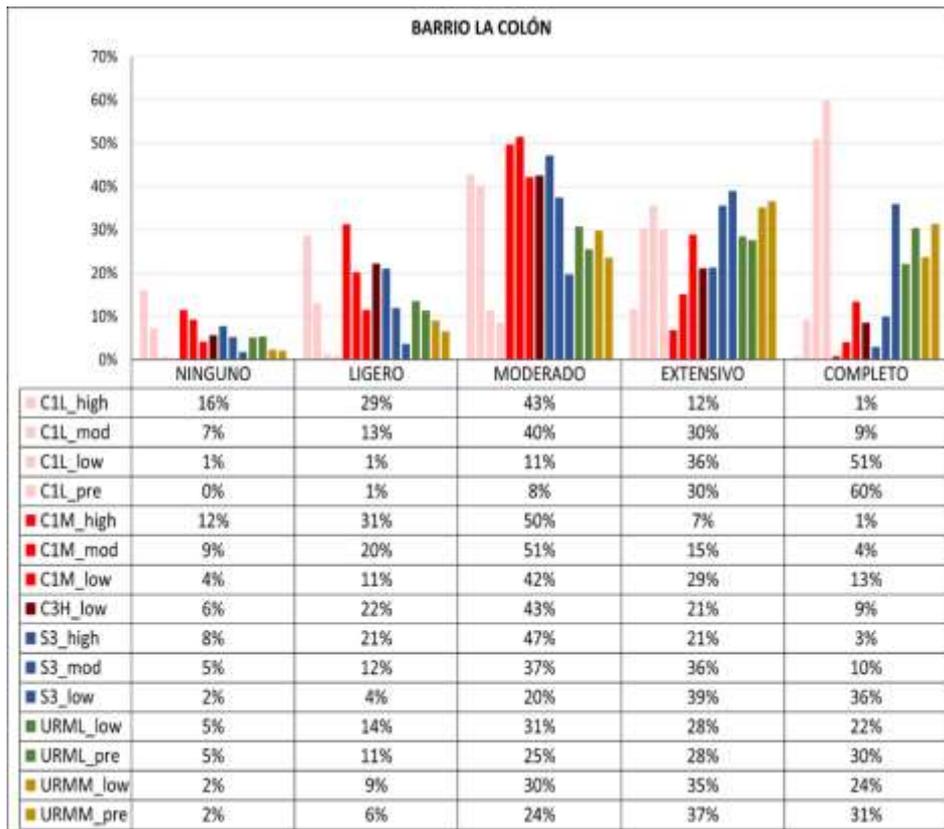


Figura 5.32: Estados de daño por tipología en el barrio La Colón.

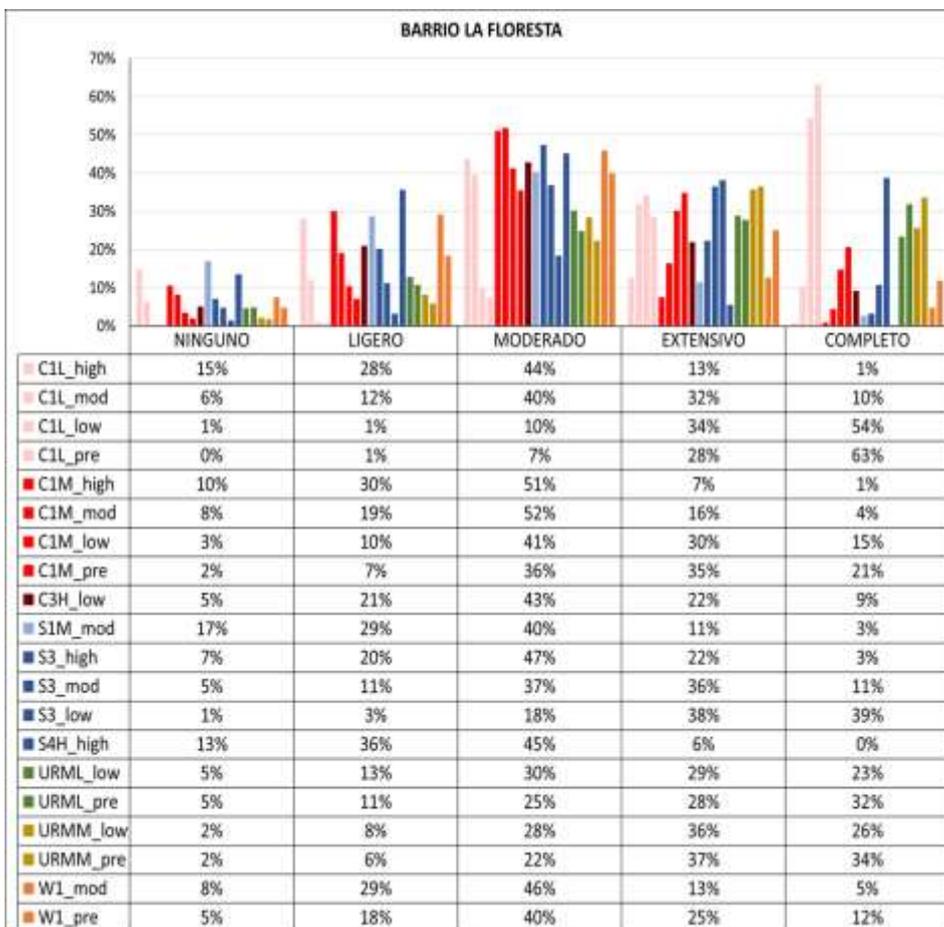
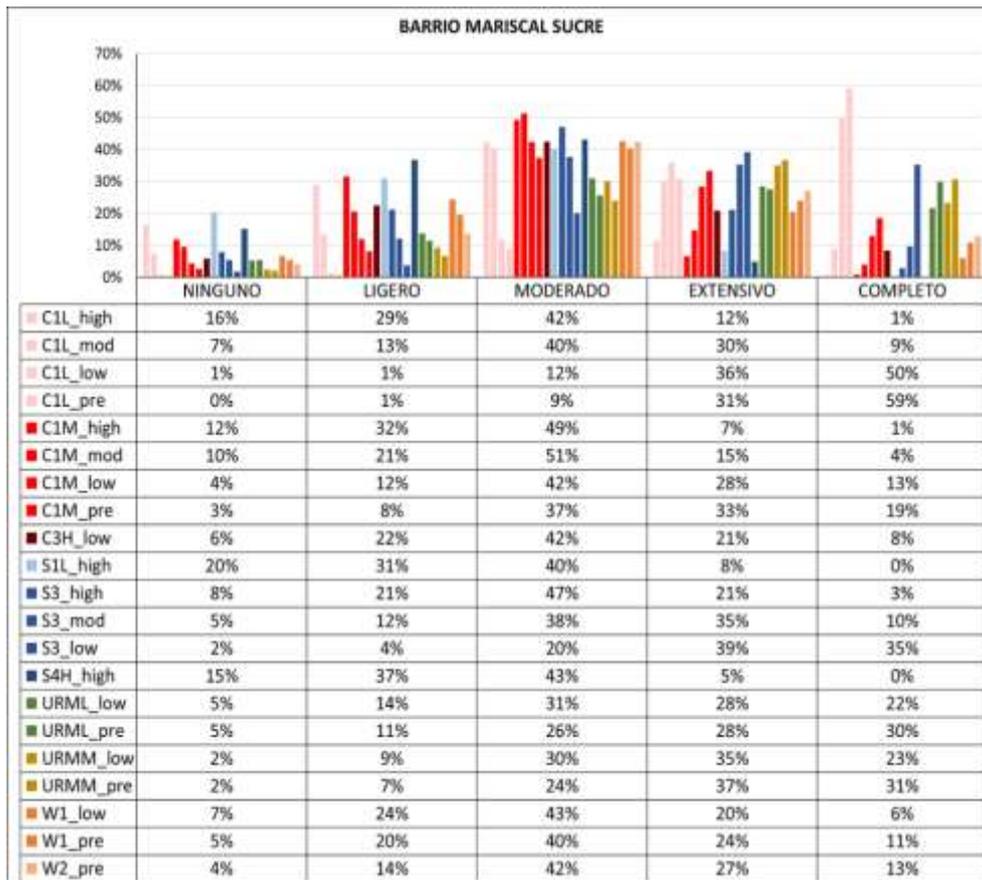


Figura 5.33: Estados de daño por tipología en el barrio La Floresta.



**Figura 5.34:** Estados de daño por tipología en el barrio: Mariscal Sucre.

El análisis de la distribución de tipologías por barrio (Tabla 5.8), junto con la probabilidad de que cada tipología alcance o supere un estado de daño (Figuras 5.32, 5.33 y 5.34), lleva a concluir los resultados que se exponen a continuación:

**Estado de daño Moderado (Figura 5.35):** La mayor cantidad de edificaciones que alcanzarían o superarían un estado de daño moderado (en el rango del 37-51.8%), se encuentran en el barrio La Floresta (58% de sus estructuras), seguido por el barrio La Colón (50% de sus estructuras) y finalmente por el barrio Mariscal Sucre (44% de sus estructuras). Las tipologías que alcanzan daño moderado en el porcentaje del 37-51.8% son las siguientes:

- Estructuras de hormigón armado de altura media C1M en todos los niveles de diseño y de hormigón armado con más de 4 plantas C3H\_low, ubicadas en su mayor parte en el barrio La Colón.
- Estructuras de hormigón armado de altura baja, pero de nivel de diseño moderado C1L\_mod y nivel de diseño alto C1L\_high, ubicadas principalmente en el barrio La Floresta.
- Estructuras de acero de nivel de diseño alto, S3\_high y S1L\_high, y nivel de diseño moderado, S3\_mod, ubicadas en su mayor parte en el barrio Mariscal Sucre

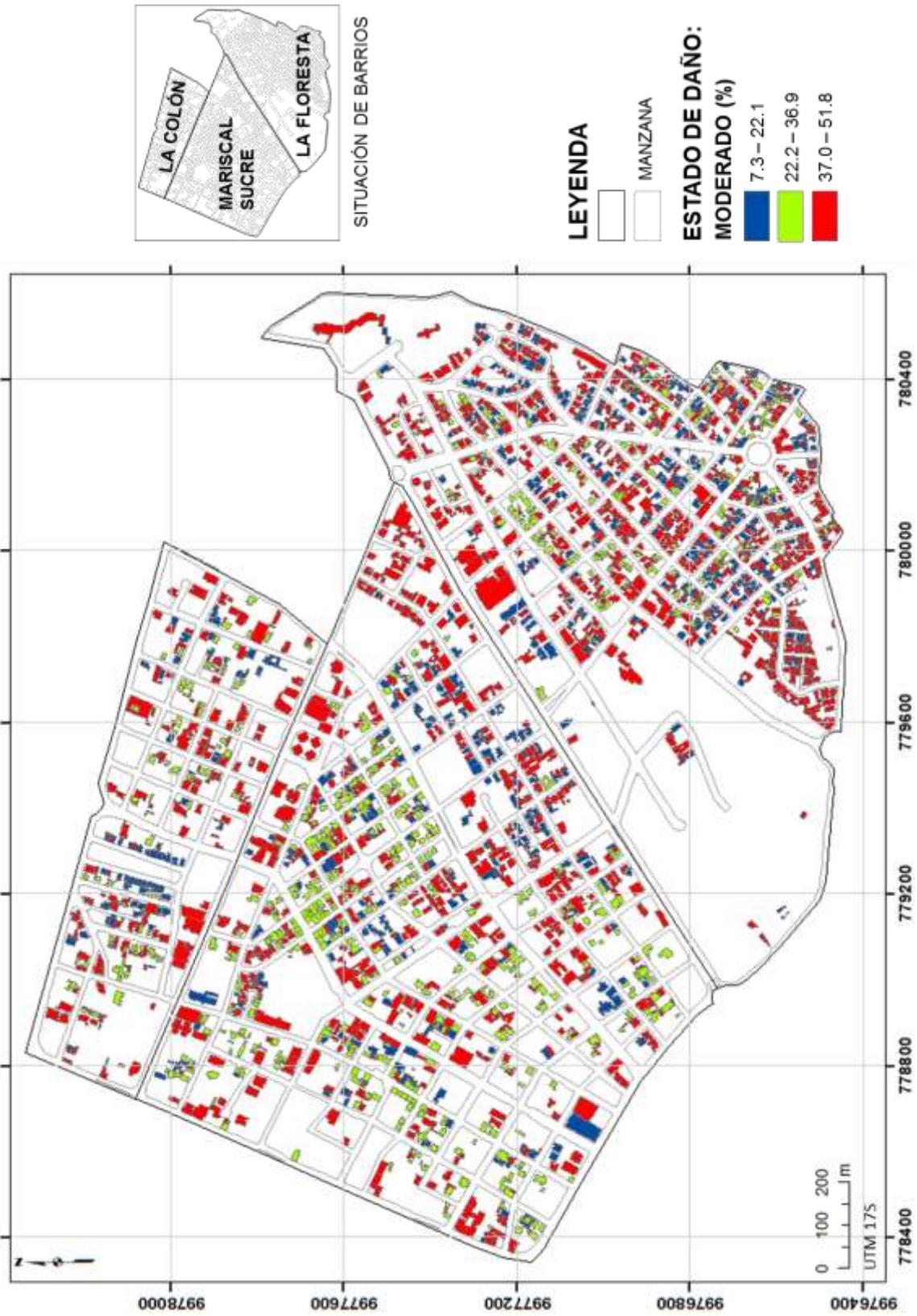
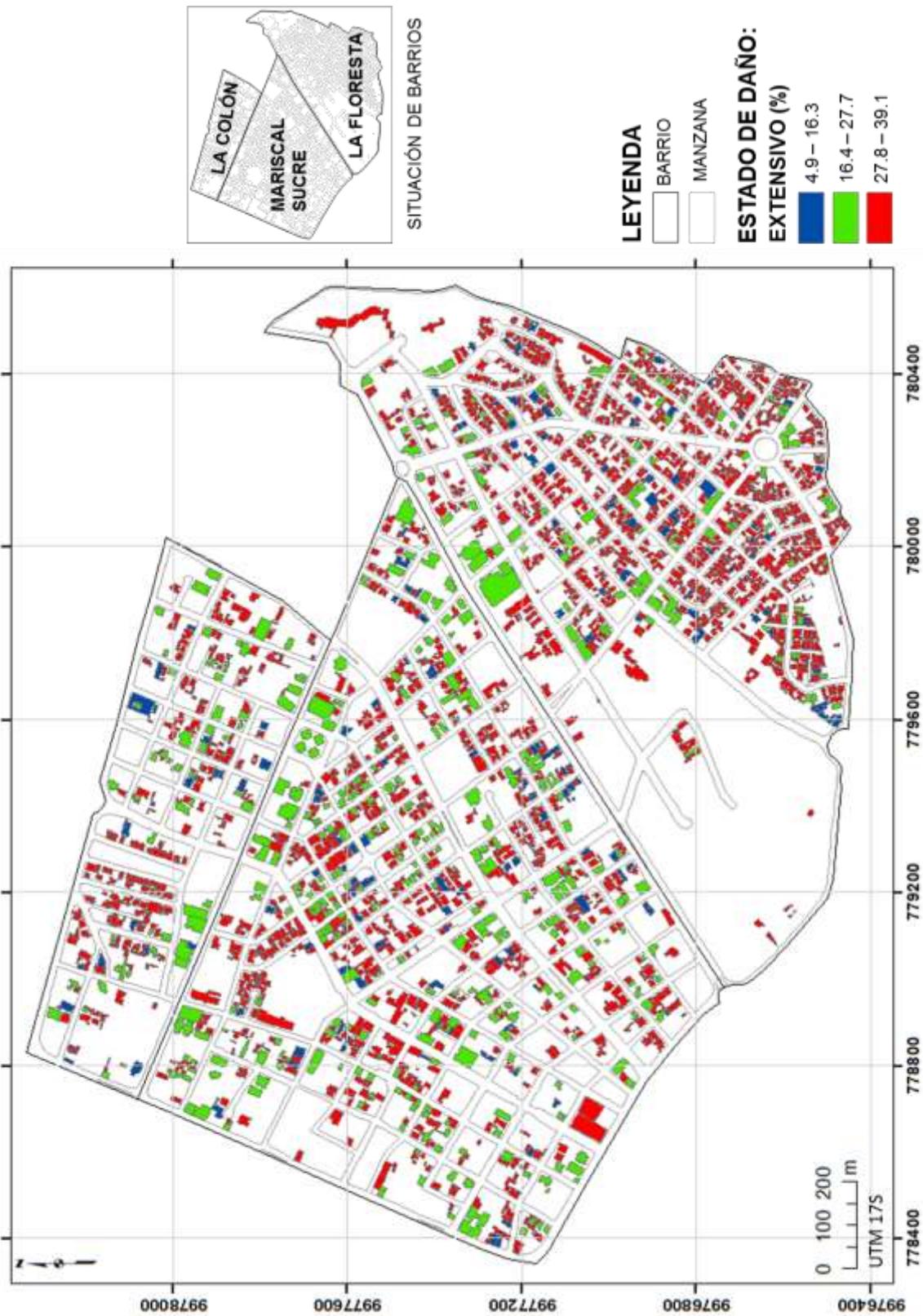


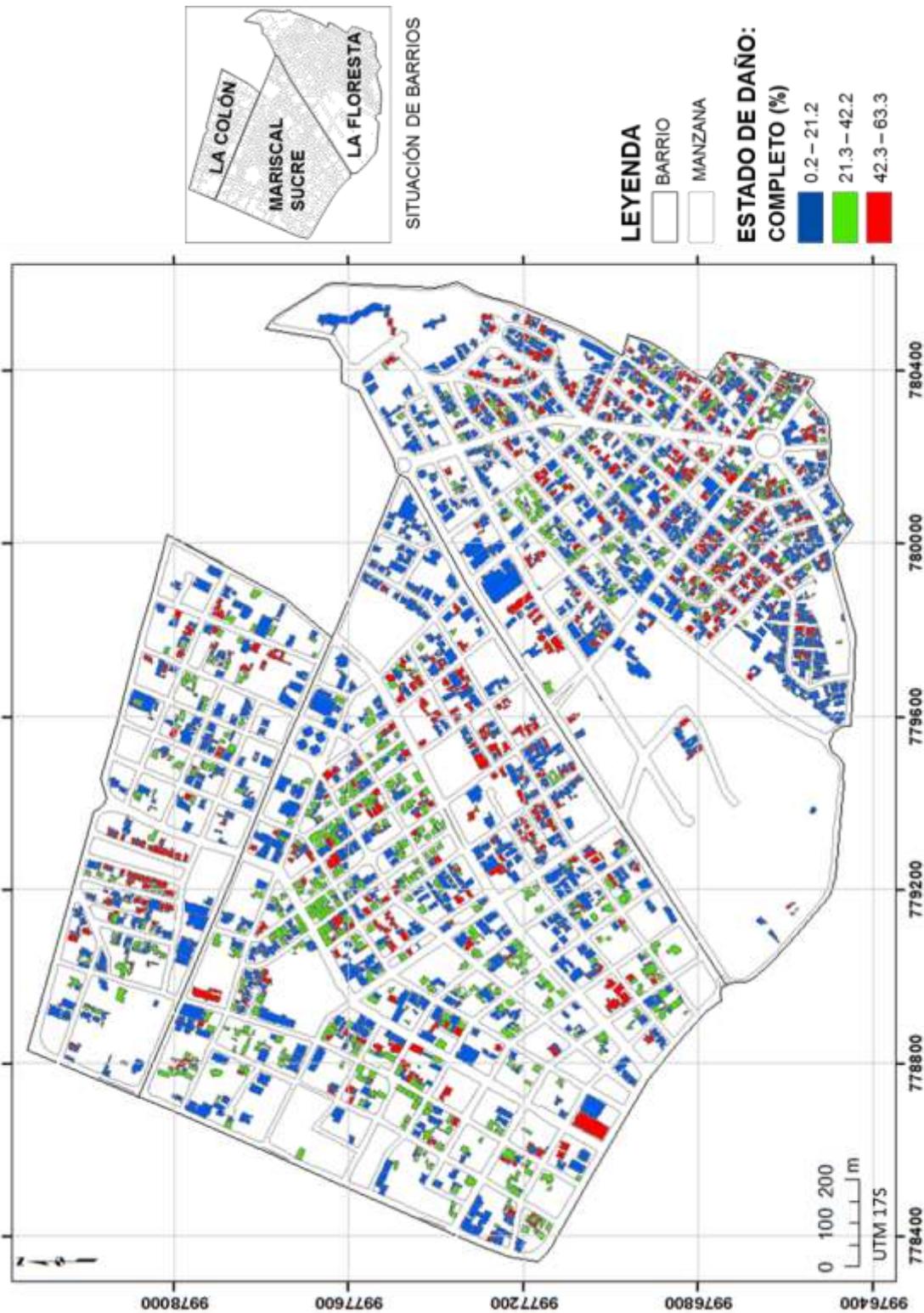
Figura 5.35: Distribución del estado de daño Moderado en cada barrio.

**Estado de daño Extenso (Figura 5.36):** el mayor número de edificaciones que alcanzarían o superarían un estado de daño extenso (en el rango del 27.8-39.1%), se encuentra en el barrio La Floresta (86% de sus estructuras), seguido por el barrio La Colón (82% de sus estructuras) y finalmente el barrio Mariscal Sucre (80% de sus estructuras).



**Figura 5.36:** Distribución del estado de daño Extenso en cada barrio.

**Estado de daño Completo (Figura 5.37):** La mayor cantidad de edificaciones que alcanzarían o superarían un estado de daño completo (en el rango del 42.3-63.3%), se encuentra en el barrio La Floresta (24% de sus estructuras) y barrio La Colón (25% de sus estructuras), con una menor proporción en el barrio Mariscal Sucre (18% de sus estructuras), cuyas tipologías corresponden a estructuras de hormigón armado de altura baja y niveles de diseño bajo y pre (C1L\_low y C1L\_pre).



**Figura 5.37:** Distribución del estado de daño Completo en cada barrio.

#### 5.4.8 ESTIMACIÓN DE OTROS INDICADORES DEL RIESGO.

Como primer indicador de riesgo, partiendo de los porcentajes anteriores se ha estimado el número de edificaciones de cada tipología y cada grado de daño, para cada barrio.

De manera adicional, se ha calculado, como indicador global del daño, el número de edificaciones que resultarían inhabitables por la acción sísmica considerada.

El cálculo de ambos indicadores de riesgo se presenta en los dos apartados siguientes.

##### 5.4.8.1 Estimación del número de edificaciones de cada tipología por estado de daño.

El número de edificaciones de cada tipología que han alcanzado cada estado de daño se calcula mediante la siguiente relación (Quirós, 2011):

$$N_{dsj}^{Ti} = P_{dsj}^{Ti} * N^{Ti} \quad (5.3)$$

donde,

$N_{dsj}^{Ti}$ : es el número de edificaciones de la tipología  $Ti$  que se estima que han alcanzado el estado  $dsj$  de daño.

$P_{dsj}^{Ti}$ : es la probabilidad de que las edificaciones de tipología  $Ti$  alcancen o superen el estado  $dsj$  de daño.

$N^{Ti}$ : es el número de edificaciones de tipología  $Ti$  que están presentes en el barrio.

En la Tabla 5.17 se muestran los resultados estimados mediante éste procedimiento para el barrio La Colón. De la tercera a la séptima columna se muestran las probabilidades de daño calculadas para cada tipología, las cuales se multiplican por la cantidad de edificaciones por tipología (columna 2), dando como resultado el número de edificaciones por grado de daño (desde la columna 8 hasta la columna 12). En las últimas filas se muestra la sumatoria de edificaciones para cada grado de daño, agrupadas en estructuras de Hormigón Armado, Marcos de Acero, Mampostería sin reforzar y Marcos de madera.

En las Tablas 5.18 y 5.19 se muestran los resultados para los barrios Mariscal Sucre y La Floresta expresados en los mismos términos.

Tabla 5.17: Porcentaje y número de edificaciones por estado de daño y clase de vulnerabilidad (barrio La Colón).

TIPOLOGÍA	Nº.	PORCENTAJE					NÚMERO					
		NI.	LE.	MO.	EX.	CO.	NI.	LE.	MO.	EX.	CO.	
C1L_high	3	16%	29%	43%	12%	1%	0.48	0.86	1.28	0.35	0.02	
C1L_mod	87	7%	13%	40%	30%	9%	6.26	11.33	35.06	26.38	7.97	
C1L_low	78	1%	1%	11%	36%	51%	0.56	1.06	8.88	27.77	39.73	
C1L_pre	1	0%	1%	8%	30%	60%	0.00	0.01	0.08	0.30	0.60	
C1M_high	5	12%	31%	50%	7%	1%	0.58	1.56	2.48	0.34	0.04	
C1M_mod	14	9%	20%	51%	15%	4%	1.29	2.83	7.21	2.11	0.56	
C1M_low	13	4%	11%	42%	29%	13%	0.53	1.49	5.48	3.75	1.75	
C3H_low	31	6%	22%	43%	21%	9%	1.75	6.86	13.20	6.54	2.65	
S3_high	2	8%	21%	47%	21%	3%	0.15	0.42	0.94	0.43	0.06	
S3_mod	1	5%	12%	37%	36%	10%	0.05	0.12	0.37	0.36	0.10	
S3_low	1	2%	4%	20%	39%	36%	0.02	0.04	0.20	0.39	0.36	
URML_low	48	5%	14%	31%	28%	22%	2.47	6.50	14.76	13.66	10.61	
URML_pre	27	5%	11%	25%	28%	30%	1.42	3.06	6.87	7.45	8.20	
URMM_low	2	2%	9%	30%	35%	24%	0.05	0.18	0.59	0.70	0.47	
URMM_pre	2	2%	6%	24%	37%	31%	0.04	0.13	0.47	0.73	0.63	
<b>TOTAL</b>	<b>315</b>						<b>16</b>	<b>36</b>	<b>98</b>	<b>91</b>	<b>74</b>	
							Hormigón armado	11.5	26.0	73.7	67.5	53.3
							Marcos de acero	0.2	0.6	1.5	1.2	0.5
							Mampostería sin reforzar	4.0	9.9	22.7	22.5	19.9

NOTACIÓN: N° número, NI.: ninguno, LE.: leve, MO.: moderado, EX.: extenso, CO.: completo (misma notación para las Tablas 5.18-5.19).



Tabla 5.19: Porcentaje y número de edificaciones por estado de daño y clase de vulnerabilidad (barrio La Floresta).

TIPOLOGÍA	Nº.	PORCENTAJE					NÚMERO					
		NI	LE.	MO.	EX.	CO.	NI.	LE.	MO.	EX.	CO.	
C1L_high	24	15%	28%	44%	13%	1%	3.57	6.72	10.46	3.04	0.21	
C1L_mod	522	6%	12%	40%	32%	10%	33.16	63.24	206.54	165.44	53.61	
C1L_low	302	1%	1%	10%	34%	54%	1.70	3.31	29.61	103.28	164.1	
C1L_pre	16	0%	1%	7%	28%	63%	0.06	0.11	1.16	4.54	10.12	
C1M_high	36	10%	30%	51%	7%	1%	3.77	10.83	18.38	2.69	0.32	
C1M_mod	82	8%	19%	52%	16%	4%	6.76	15.65	42.50	13.43	3.65	
C1M_low	23	3%	10%	41%	30%	15%	0.79	2.39	9.50	6.94	3.39	
C1M_pre	1	2%	7%	36%	35%	21%	0.02	0.07	0.36	0.35	0.21	
C3H_low	20	5%	21%	43%	22%	9%	1.01	4.20	8.56	4.39	1.84	
S1M_mod	1	17%	29%	40%	11%	3%	0.17	0.29	0.40	0.11	0.03	
S3_high	1	7%	20%	47%	22%	3%	0.07	0.20	0.47	0.22	0.03	
S3_mod	6	5%	11%	37%	36%	11%	0.28	0.67	2.21	2.19	0.65	
S3_low	9	1%	3%	18%	38%	39%	0.13	0.29	1.65	3.44	3.49	
S4H_high	0	13%	36%	45%	6%	0%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
URML_low	75	5%	13%	30%	29%	23%	3.48	9.62	22.66	21.65	17.59	
URML_pre	107	5%	11%	25%	28%	32%	5.16	11.54	26.60	29.65	34.05	
URMM_low	9	2%	8%	28%	36%	26%	0.18	0.74	2.56	3.22	2.31	
URMM_pre	3	2%	6%	22%	37%	34%	0.05	0.18	0.67	1.10	1.01	
W1_mod	4	8%	29%	46%	13%	5%	0.30	1.17	1.84	0.50	0.19	
W1_pre	1	5%	18%	40%	25%	12%	0.05	0.18	0.40	0.25	0.12	
<b>TOTAL</b>	<b>1242</b>						<b>61</b>	<b>131</b>	<b>387</b>	<b>366</b>	<b>297</b>	
							Hormigón armado	50.8	106.5	327.1	304.1	237.5
							Marcos de acero	0.7	1.5	4.7	6.0	4.2
							Mampostería sin reforzar	8.9	22.1	52.5	55.6	54.9
							Marcos de madera	0.3	1.4	2.2	0.8	0.3

Como se puede observar en las Figuras 5.38, 5.39 y 5.40, el mayor número de edificaciones en los tres barrios resulta con un estado de daño moderado y extenso, seguido por el estado de daño completo y finalmente por los estados de daño leve y ninguno.



Figura 5.38: Número de edificaciones de uso residencial por estado de daño en el barrio La Colón.



Figura 5.39: Número de edificaciones de uso residencial por estado de daño en el barrio La Floresta.



Figura 5.40: Número de edificaciones de uso residencial por estado de daño en el barrio Mariscal Sucre.

Al realizar un análisis generalizado del número de edificaciones por estado de daño y por tipología constructiva (Figuras 5.41, 5.42, 5.43 y 5.44), se ha podido observar que en un rango del 57 al 66 %, las estructuras presentan un estado de daño entre moderado y extenso, mientras en un rango del 17 al 27 % presentan un estado de daño completo.

Un caso aparte lo representan las estructuras de marcos de madera, que presentan un 7% de estado de daño completo, lo que se debería a que, como se ha mencionado anteriormente, para alcanzar su punto de desplazamiento último requieren mayores niveles de aceleración ( $A_u$ ) y de desplazamiento espectral ( $D_u$ ). Por esta razón, además, presentan un 24% de daño leve, mientras el resto de estructuras se encuentra entre un porcentaje del 11 al 12 % para este grado de daño.

Finalmente, para todas las tipologías el porcentaje de daño nulo oscila entre un 5 y 6%.



Figura 5.41: Cantidad de edificaciones de hormigón armado por estado de daño en la Parroquia Mariscal Sucre.

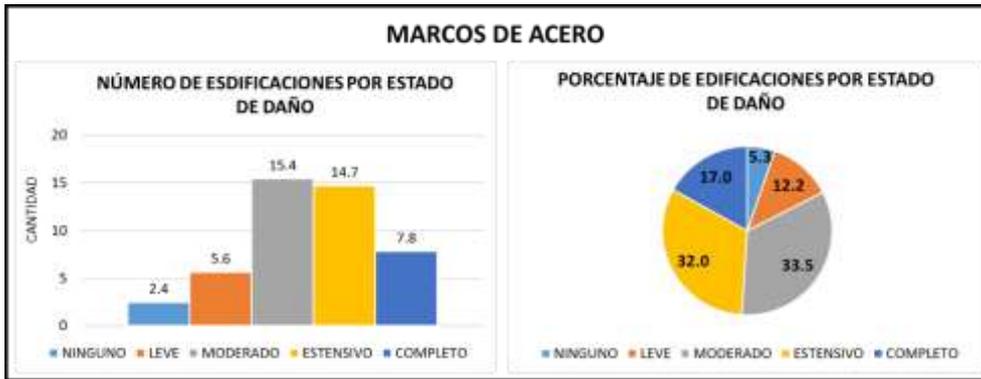


Figura 5.42: Cantidad de edificaciones de marcos de acero por estado de daño en la Parroquia Mariscal Sucre.

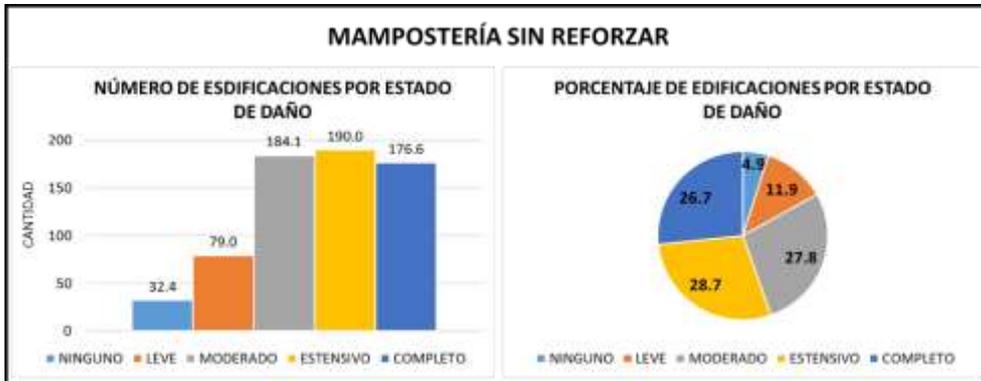


Figura 5.43: Cantidad de edificaciones de mampostería sin reforzar por estado de daño en la Parroquia Mariscal Sucre.

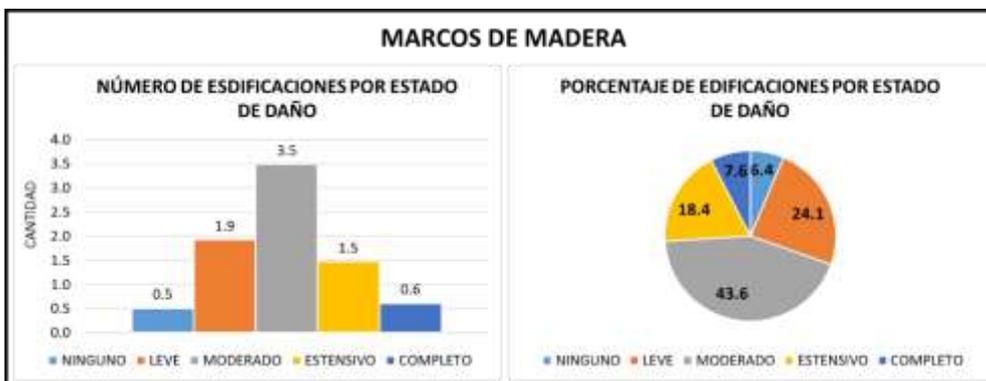


Figura 5.44: Cantidad de edificaciones de marcos de madera por estado de daño en la Parroquia Mariscal Sucre.

#### 5.4.8.2 Estimación del número de edificaciones inhabitables.

Los estados de daño definidos anteriormente han sido utilizados para estimar el escenario de daños expresado en función de un único indicador global de riesgo que es el número de edificaciones que resultarían inhabitables por la acción sísmica considerada.

Para estimar éste parámetro, se han utilizado las metodologías de Coburn y Spence (1992) y Vacareanu et al. (2003), esta última incluida en el proyecto RISK-UE (2003).

Ambas metodologías estiman el número de edificaciones inhabitables a partir del número de edificaciones que resultan con los grados de daño moderado, extenso y completo, a través de las siguientes relaciones:

$$\text{Coburn y Spence (1992):} \quad N_{\text{ed In}} = N^{\circ}_{\text{ed EX}} + N^{\circ}_{\text{ed CO}} + N^{\circ}_{\text{ed MO}} * 0.5 \quad (5.4)$$

$$\text{Vacareanu et al. (2003):} \quad N_{\text{ed In}} = N^{\circ}_{\text{ed EX}} + N^{\circ}_{\text{ed CO}} + N^{\circ}_{\text{ed MO}} * 0.9 \quad (5.5)$$

donde,

$N_{\text{ed In}}$ : número de edificaciones inhabitables.

$N^{\circ}_{\text{ed EX}}$ : número de edificaciones con daño extenso.

$N^{\circ}_{\text{ed CO}}$ : número de edificaciones con daño completo.

$N^{\circ}_{\text{ed MO}}$ : número de edificaciones con daño moderado.

En la Figura 5.45 se han representado los resultados obtenidos, que muestran el número de edificaciones inhabitables en función del daño esperado en cada barrio, donde se observa que la metodología de Vacareanu et al. (2003) presenta un 12% más de edificaciones con riesgo de habitabilidad en relación con los resultados obtenidos con Coburn y Spence (1992). Esto se debería a los diferentes coeficientes de cálculo utilizados en ambas relaciones, que suponen diferentes ponderaciones del estado de daño moderado.



Figura 5.45: Número de edificaciones con riesgo de habitabilidad, estimadas con las relaciones propuestas por Coburn y Spence (1992) y Vacareanu et al., (2004).

## 5.5 DISCUSIÓN.

Debido a la alta amenaza sísmica que experimenta Ecuador y a la presencia de estructuras vulnerables en la ciudad de Quito, se han realizado algunos esfuerzos tendientes a evaluar el riesgo sísmico en la ciudad.

Los resultados de los estudios más recientes de peligrosidad sísmica en los que se considera a la ciudad de Quito, corresponden a los publicados en la NEC-11 (en el que se determina una aceleración pico de 0.4 g para la ciudad, para un período de 475 años) y a la publicación realizada por Beauval et al. (2014), en la cual no se llega a estimar un terremoto de control, pero se muestra que la zona de corteza (planteada en su estudio) donde se ubica la ciudad, sería la única zona fuente que contribuye a la peligrosidad sísmica en Quito (período de retorno de 475 años).

En el presente trabajo se ha identificado un sismo de control que corresponde al par (Mw 6.2, Distancia 0-30 km), que podría estar asociado a la falla Ilumbisí la Bota, que forma parte del Sistema de fallas Quito, identificado en los trabajos de Aguiar et al. (2014 a y b) y de Alvarado et al. (2014).

Adicionalmente, se ha considerado el efecto local para tres barrios de la Parroquia Mariscal Sucre, mediante el uso de un modelo de atenuación (Zhao et al. 2006) y haciendo uso de los últimos resultados de microzonificación obtenidos en la ciudad a través del proyecto ejecutado por ERN-AL (2012). Este modelo ha sido también aplicado en el trabajo de Aguiar et al. (2014a) para terremotos corticales en Quito.

En lo referente a estudios de riesgo sísmico desarrollados en Quito, se cuenta con el realizado a través del Proyecto de Manejo del Riesgo Sísmico en Quito en 1994, en el cual, a falta de información catastral, se realizó un inventario de edificaciones y se hizo una agrupación según el material predominante de construcción. Posteriormente se simuló la ocurrencia de un sismo teórico cortical, de magnitud Mw 6.5 a 25 km de la ciudad, obteniendo un mapa de intensidades macrosísmicas (en la escala MSK) esperadas debido a la ocurrencia de dicho sismo local.

En el presente trabajo, el estudio de riesgo sísmico para las edificaciones de uso residencial ubicadas en la Parroquia Mariscal Sucre, se inició con la generación de un sistema de información geográfica, que contiene información de la base de datos catastral proporcionada por el Municipio de Quito, para posteriormente realizar la identificación de tipologías constructivas, asignación de clases de vulnerabilidad, curvas de capacidad y fragilidad, en base a las especificaciones propuestas en HAZUS (2003).

Se han estimado probabilidades de daño para cada una de las tipologías identificadas, considerando la acción sísmica asociada al terremoto de control estimado con carácter probabilista y aplicando la metodología propuesta en FEMA 440 (2005), para la determinación de las demandas de desplazamiento global máximo.

Como resultados del estudio de riesgo sísmico, se han obtenido el número de edificaciones por tipología y estado de daño y el número de edificaciones con riesgo de habitabilidad, aplicando las metodologías publicadas en Coburn et al., 1992 y Vacareanu et al., 2003.

La metodología propuesta puede ser replicable para el resto de parroquias pertenecientes a la ciudad de Quito para edificaciones de uso residencial.

## **Capítulo 6**

# **RESUMEN, CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO**



## 6.1 RESUMEN Y CONCLUSIONES.

Este trabajo de tesis se ha iniciado con el **cálculo de la peligrosidad** sísmica siguiendo un modelo probabilista zonificado (PSHA), en todo el territorio de Ecuador continental. Para la realización del estudio se han desarrollado específicamente dos de los inputs necesarios para el cálculo de la peligrosidad: **un catálogo sísmico de proyecto y un modelo de zonas sismogénéticas**. El tercer input, modelo de movimiento fuerte o GMPE's, se ha seleccionado entre los existentes en la literatura especializada, teniendo en cuenta las características de atenuación de Ecuador.

El **catálogo sísmico** confeccionado, considerando datos de diferentes agencias, cubre el periodo de 1584 a 2014. El parámetro de tamaño se ha homogenizado a magnitud momento ( $M_w$ ) y se ha efectuado la corrección por falta de completitud de las menores magnitudes al remontarnos en el tiempo. Además, se ha depurado de réplicas y premonitores, para verificar la hipótesis de independencia de sismos requerida por el método zonificado. El catálogo final resultante contiene 2062 registros en un rango de magnitudes  $M_w$  de 4.0 a 8.8. Esta última es la mayor magnitud registrada, correspondiente a un sismo ocurrido en enero de 1906 y localizado entre la línea de costa y la trinchera de subducción. La mayor parte de los eventos (93%) corresponden a magnitudes  $M_w \leq 5.5$ , mientras que el 0.9% corresponde a magnitudes  $M_w \geq 7.0$ . El apartado 4.31 describe todo lo referente a la confección de este catálogo de proyecto.

El **modelo de zonas sismogénéticas** se ha definido combinado distintos tipos de información geofísica e identificando los límites de zonas agrupadas en tres regímenes tectónicos: cortical, subducción interfase y subducción in-slab. Se ha analizado particularmente el buzamiento de la subducción, resultando una propuesta de zonas coherente con el conocimiento físico, geológico y tectónico de la región de estudio. El modelo propuesto contiene 14 zonas corticales, 3 de subducción interfase y 4 de subducción in-slab. Las zonas definidas se muestran en las Figuras 4.16 (cortical) y 4.24 (subducción) y su descripción es contenida en el apartado 4.3.2.

La **sismicidad** de cada zona se ha ajustado a un modelo de Gutenberg-Richter truncado a una magnitud mínima  $m_0$  de 4.0 ( $M_w$ ). El ajuste de la recta de Gutenberg-Richter para obtener los parámetros de sismicidad se ha realizado mediante el método de máxima verosimilitud, utilizando la propuesta de Weichert (1980). En algunos casos de zonas costeras se ha observado que el patrón de sismicidad requería un doble ajuste, reflejando menor pendiente en el rango de las mayores magnitudes. (apartado 4.3.3, Anexo 1.).

A falta de acelerogramas locales disponibles para el desarrollo de ecuaciones de predicción de movimiento fuerte propias, se han seleccionado GMPEs foráneas, formuladas para regímenes de subducción y de corteza en otras zonas del mundo, para lo cual se han identificado las que mejor se ajustan al ambiente tectónico que se observa en Ecuador. Siendo conscientes de las limitaciones que implica su aplicabilidad, se ha tratado de cuantificar la incertidumbre epistémica, introduciendo un nodo del árbol lógico, en cuyas ramas se consideran combinaciones de modelos para los tres regímenes tectónicos enunciados anteriormente.

Se ha **calculado la peligrosidad sísmica** en términos de cinco aceleraciones espectrales SA(T) para periodos estructurales T de 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, y 2.0 s, además de la PGA. Se han

representado mapas de peligrosidad expresados en términos de PGA y SA (1s) para tres períodos de retorno: 475, 975 y 2475 años, que corresponden a los movimientos esperados con probabilidad de excedencia del 10, 5 y 2% en 50 años, respectivamente. Las Figuras 4.29 y 4.30 muestran los mapas resultantes, que representan valores medios obtenidos con las cuatro combinaciones de modelos de atenuación y las distribuciones adoptadas para cuantificar la incertidumbre aleatoria inherente a los parámetros de sismicidad. Los mayores valores de PGA se presentan para los tres períodos de retorno en las zonas cercanas a la línea de costa ecuatoriana, especialmente en la Península de Santa Elena, Península de Manabí y Península de Esmeraldas. Se obtienen también valores altos en la región interandina y en el sureste del territorio continental ecuatoriano, concretamente en la región de la Cordillera del Cóndor, donde además del fallamiento local se añade el efecto de la subducción.

Concretamente, para un período de retorno de 475 años, la PGA alcanza valores máximos de 0.76 g en la zona de la Península de Esmeraldas y 0.4 g en la Región Interandina y el sureste ecuatoriano. Al avanzar hacia el oriente la PGA decrece hasta valores menores a 0.15 g. Para períodos de retorno de 975 y 2475 años las isolíneas de PGA son bastante similares, aunque los valores son mayores al aumentar el periodo de retorno, con máximos de 1.0 y 1.37 g respectivamente en las zonas con mayor peligrosidad.

En los mapas de peligrosidad en términos de SA (1s), los mayores valores son observados en la costa, haciendo evidente la gran influencia de la actividad de la subducción para el período estructural de 1s. Se observan valores máximos de 0.61 g, 0.87 g y 1.28 g para períodos de retorno de 475, 975 y 2475 años respectivamente.

Además, se han estimado las **curvas de peligrosidad** y los **espectros de peligrosidad uniforme** para cuatro capitales de provincia: **Quito, Esmeraldas, Guayaquil y Loja**. En todos los casos, se han considerado emplazamientos genéricos localizados en roca. (apartado 4.4.2; Figuras 4.31 y 4.32).

Como una nueva contribución, se han obtenido también resultados de **desagregación** de la peligrosidad para las cuatro ciudades indicadas, proveyendo pares ( $M_w$ , R) que más contribuyen a la peligrosidad y que se identifican con los terremotos de control. (Figuras 4.33. y 4.34; Tabla 4.10).

Del análisis de los resultados específicos para las capitales - curvas de peligrosidad, UHS y sismos de control - se concluye que la mayor peligrosidad se esperaría en la ciudad de Esmeraldas, que sería la consecuencia del proceso de subducción interface; seguida por las ciudades de Quito, donde la peligrosidad estaría dominada por la actividad cortical; Guayaquil que estaría influenciada mayormente por la fuente de subducción in-slab y finalmente la ciudad de Loja, donde la peligrosidad estaría dominada por la actividad in-slab (apartado 4.5).

Los resultados de este estudio pueden tener distintas aplicaciones, como: definición directa de la acción sísmica (y no a través de formas espectrales) para el diseño sismorresistente, tanto de estructuras de importancia normal, como de importancia especial. Además, los terremotos de control obtenidos por desagregación permiten el cálculo de espectros específicos de respuesta para estructuras singulares, como presas, puentes, etc. Por último, estos resultados pueden servir de input para futuros estudios de riesgo sísmico, de aplicación en la elaboración de planes de emergencia, acciones post-evento y medidas de mitigación.

El estudio de **riesgo sísmico** para las edificaciones de uso residencial ubicadas en la Parroquia Mariscal Sucre de la ciudad de Quito, se ha iniciado con la generación de un **sistema de**

**información geográfica**, que contiene información gráfica y alfanumérica de la base de datos catastral proporcionada para este estudio por el Municipio de Quito. (apartado 5.2).

Para la generación del **escenario sísmico** que actuará como **input del riesgo**, se ha considerado el terremoto de control identificado previamente por desagregación de la peligrosidad para un período de retorno de 475 años, que corresponde al nivel de probabilidad estipulado en normas sismorresistentes para construcciones de importancia normal. Dicho sismo de control se identifica con el par ( $M_w$  6.25,  $R=$  0-30 km), y como escenario sísmico más probable, compatible con la magnitud y distancia estimadas, se ha identificado la falla Ilumbisí La Bota. (apartado 5.3).

El cálculo de la acción sísmica asociada al escenario definido ha requerido la integración de los efectos de la fuente, trayectoria y sitio, en cada punto de la zona donde se calcula después el riesgo. Para modelizar la Fuente se ha simulado un sismo de  $M_w$  6.25, considerando el plano y características de ruptura de la falla Ilumbisí La Bota. El efecto de la trayectoria se ha considerado a través del modelo de atenuación propuesto por Zhao et al. (2006) y para la estimación del efecto local se han utilizado los resultados de microzonificación obtenidos por el Consorcio Evaluación de Riesgos Naturales-América Latina en el año 2012. Se han calculado entonces espectros específicos de respuesta para los tres barrios que conforman la parroquia Mariscal Sucre (La Colón, La Floresta y Mariscal Sucre), aplicando el modelo de Zhao (2006) que incluye un término para cuantificar el efecto local en función de la  $V_{s30}$  de cada tipo de suelo. Esos espectros constituyen las curvas de demanda en representación de la acción sísmica para el cálculo de riesgo. (apartado 5.3.2., Figura 5.12).

El **estudio de vulnerabilidad** se ha iniciado con la identificación de las de tipologías constructivas dominantes en la zona de estudio a partir de la información contenida en el SIG construido previamente. A cada una de las tipologías se ha asignado una clase de vulnerabilidad, en la escala propuesta por HAZUS (2003). En total se han identificado 23 tipologías diferenciadas por su estructura constructiva, altura (pisos) y nivel de diseño. (apartado 5.4.2, Tabla 5.8).

Se han asignado las curvas de capacidad de cada clase, también propuestas por HAZUS (2003). (apartado 5.4.3, Tabla 5.9, Figuras 5.15 a 5.25).

Para generar los **escenarios de daño** teniendo en cuenta la acción sísmica definida y la distribución de clases de vulnerabilidad, se han cruzado las curvas de demanda y capacidad y se ha procedido a estimar las demandas de desplazamiento, mediante el **Método de Coeficiente de Desplazamiento Mejorado** propuesto en FEMA 440 (2005). Este permite obtener la demanda de desplazamiento global, mediante la modificación de la respuesta elástica lineal del sistema equivalente de un grado de libertad (desplazamiento espectral pico) al multiplicarla por coeficientes que cuantifican la tasa de desplazamiento máximo y el ajuste por degradación cíclica de cada estructura. (apartado 5.4.4, Tablas 5.10, 5.11 y 5.12).

Una vez estimadas las demandas de desplazamiento global para cada clase de vulnerabilidad y en cada barrio, se ha estimado la probabilidad de alcanzar o exceder un estado de daño para cada una de las tipologías mediante el uso de **curvas de fragilidad** (apartado 5.4.6, Figuras 5.32 -5.37). Como resultado global, para todas las tipologías el daño predominante es moderado, seguido en porcentaje por el daño extenso y completo. Los menores porcentajes corresponden a daño leve o a ningún daño. Las edificaciones de mampostería experimentan, en general, menor daño que las de hormigón armado de nivel de diseño low y pre. De las distribuciones de daño observadas son destacables, además, las siguientes particularidades:

- Las tipologías que presentan una mayor probabilidad de alcanzar el grado de daño completo son las de hormigón armado C1L\_low y C1L\_pre.
- Las tipologías que presentan una mayor probabilidad de alcanzar el grado de daño moderado son las de hormigón de altura media, C1M.
- En el barrio La Floresta, donde el desarrollo urbanístico comienza a partir del año 1977, con la presencia de estructuras de hormigón armado de altura baja y media, el daño predominante resulta ser moderado.
- Las edificaciones de hormigón armado de altura mayor o igual a 8 pisos, ubicadas principalmente en el barrio Mariscal Sucre, presentan mayor probabilidad de alcanzar los estados de daño moderado y ligero.
- El barrio Mariscal Sucre, es el que presenta un desarrollo urbanístico más antiguo de la parroquia, con mayor número de edificaciones de mampostería no reforzada, de altura baja y media y nivel de diseño low y pre. El daño extenso es dominante para estas tipologías.

## 6.2 LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO.

El estudio realizado, tanto en lo referente al cálculo de la peligrosidad como del riesgo sísmico, ha permitido identificar algunas líneas de trabajo futuras, para la mejora del conocimiento en ambos campos.

- Modelización de fallas activas y cálculo de la peligrosidad incluyendo fallas como unidades independientes, con modelos de sismicidad no poissonianos, teniendo en cuenta los periodos de recurrencia y tasa de actividad de las fallas, su geometría, mecanismo focal, etc.
- Estudio de los grandes sismos históricos relacionados con la subducción, con la consiguiente mejora en las estimaciones de la magnitud máxima  $M_{max}$ .
- Calibración de modelos de movimiento fuerte (GMPes) con datos locales que se vayan registrando en el país, por la red acelerométrica ecuatoriana. Esto permitiría disminuir la incertidumbre inherente a uno de los aspectos más críticos en el cálculo de la peligrosidad sísmica: el modelo de atenuación.
- Cálculo del riesgo sísmico en las cuatro ciudades donde se han obtenido escenarios específicos de peligrosidad, replicando la metodología seguida en la parroquia de Mariscal Sucre de Quito.



## **REFERENCIAS.**



## REFERENCIAS.

- Aguiar R., Castro C., Garzón Ch., Yanchatuña W., et al. (2009). Magnitud máxima en zonas fuentes para estudios de peligrosidad sísmica del Ecuador. Centro de Investigaciones Científicas, CEINCI-ESPE, Revista Ciencia. 12 (2): 109-121.
- Aguiar R. (2013). Microzonificación sísmica de Quito. Primera edición, CEINCI-ESPE, Quito-Ecuador. 212 pp. ISBN-13: 978-9942-9927-3-4
- Aguiar R., Rivas A., Benito M. A., Gaspar J., Trujillo S., Arciniegas S., Villalva P., Parra H., (2014a). Aceleraciones Registradas y Calculadas del Sismo del 12 de agosto de 2014 en Quito. Centro de Investigaciones Científicas. CEINCI-ESPE. Revista Ciencia. 16 (2): 139-153.
- Aguiar R., Rivas A., Trujillo S., Gaspar J., Parra H., (2014b). Movimientos fuertes y espectros para el Centro Norte de Quito asociados a las fallas ciegas inversas. Centro de Investigaciones Científicas. CEINCI-ESPE. Revista Ciencia. 16 (2): 1-31.
- Alvarado A. (2012). Néotectonique et cinématique de la déformation continentale en Equateur. Thèse de doctorat (PhD), Université de Grenoble, France. 259 pp.
- Alvarado A., Audin L., Nocquet J. M., Lagreulet S., et al., (2014). Active tectonics in Quito, Ecuador, assessed by geomorphological studies, GPS data, and crustal seismicity. *Tectonics*. 33(2): 67-83. doi: 10.1002/2012TC003224.
- Arango M. C., Strasser F. O., Bommer J. J., Cepeda J. M., Boroschek R., Hernandez D. A., Tavera H. (2012). An Evaluation of the Applicability of Current Ground-Motion Models to the South and Central American Subduction Zones. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 102(1): 143-168.
- ATC-40 (1996). Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings, Volume 1, Applied Technology Council, Report SSC 96-01, California, USA. 356 pp.
- Atlas de Amenazas Naturales y exposición de Infraestructura del Distrito Metropolitano de Quito (2014). Segunda edición, Quito-Ecuador. 122 pp.
- Baize S., Audin L., Winter T., Alvarado A., Moreno L. P., Taipe M., Yepes H. (2014). Paleoseismology and tectonic geomorphology of the Pallatanga fault (Central Ecuador), a major structure of the South-American crust. *Geomorphology*.
- Beauval C., Yepes H., Bakun W. H., Egred J., Alvarado A., Singaicho J. C. (2010). Locations and magnitudes of historical earthquakes in the Sierra of Ecuador (1587–1996). *Geophysical Journal International*. 181(3): 1613-1633. doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04569.x.
- Beauval C., Yepes H., Palacios P., Segovia M., Alvarado A., Font Y., Aguilar J., Troncoso L., Vaca S. (2013). An earthquake catalog for seismic hazard assessment in Ecuador. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 103: 773-786. doi: 10.1785/0120120270.
- Beauval C., Yepes H., Audin L., Alvarado A., Nocquet J. M., Monelli D., Danciu L. (2014). Probabilistic Seismic-Hazard Assessment in Quito, Estimates and Uncertainties. *Seismological Research Letters*. 85(6): 1316-1327.
- Benito M. B. y Jiménez M. (1999). Peligrosidad Sísmica. *Física de la Tierra*. 11: 13-47. ISSN: 0214-4557.

- Benito M. B., Lindholm C., Camacho E., Climent A., Marroquín G., Molina E., Rojas W., Torres Y., (2010). Amenaza sísmica en América Central. Entinema, 28004 Madrid. pp. 141-271. ISBN 978-84-8319-474-4.
- Benito M. B., Lindholm C., Camacho E., et al. (2012). A New Evaluation of Seismic Hazard for the Central America Region. Bulletin of the Seismological Society of America. 102 (2): 504-523. doi: 10.1785/0120110015.
- Bernreuter D., Savy J., Mensing R., Chen C. (1989). Seismic Hazard Characterization of 69 Nuclear Power Plant Sites East of the Rocky Mountains. Lawrence Livermore National Laboratory. Report UCRL-JC-111964, Livermore California.
- Budnitz R., Apostolakis G., Boore D., Cluff L., Coppersmith K., Cornell C., Morris P. (1997). Recommendations for Probabilistic Seismic Hazard Analysis: Guidance of Acertainty an Use of Experts. Senior Seismic Hazard Analysis Committee. United States Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-6372.
- Cañada R., Cervera B., Fernández F., et al. (2007). Sistemas y Análisis de la Información Geográfica, 2ª edición. Editado por RA-Ma Editorial, España. Parte X, Capítulo V. pp 833-861.
- CEC (2001). Código Ecuatoriano de la Construcción. Requisitos generales de diseño: peligro sísmico, espectros de diseño y requisitos mínimos de cálculos para diseño sismo resistente. Registro Oficial No. 382 de 2 de agosto de 2001.
- Chatelain B., Tucker B., et al. (1999). Earthquake risk management piloto Project in Quito, Ecuador. Geo Journal. 49: 185-196.
- Chunga K., Michetti A. M., Pazmiño N., Martillo C., Romero A., Quiñonez M. (2009). Estimación de máximos niveles de sismicidad para el litoral ecuatoriano a través de la integración de datos geológicos, sismológicos y sismotectónicos. Revista Internacional: Oro y Petróleo. 19: 46-57.
- Chunga K. (2010). Terremoti crostali e zonoine sísmica dell'Ecuador attraverso l'integrazione dei dati geologici, sismologici e morfostrutturali. Tesis Doctoral, Università degli Studi dell'Insubria, Dipartimento di Scienze Chimiche ed Ambientali, Italia. 165 pp.
- Coburn A. and Spence R., (1992). Earthquake Protection. Ed.: Wiley. 355pp.
- Collot J. Y., Michaud F., Alvarado A., Marcaillou B., Sosson M., Ratzov G., Pazmino A. (2009). Visión general de la morfología submarina del margen convergente de Ecuador-Sur de Colombia: Implicaciones sobre la transferencia de masa y la edad de la subducción de la Cordillera de Carnegie. En: Geología y Geofísica Marina y Terrestre del Ecuador desde la Costa Continental hasta las Islas Galápagos. Editores: Collot J. Y., Sallares V., Pazmiño N. Impreso: Argudo & Asociados, Guayaquil-Ecuador. pp. 47-74. ISBN-978-9978-92-737-3.
- Cornell, C. A. (1968). Engineering Seismic Risk Analysis. Bulletin of the Seismological Society of America. 58 (5): 1583-1606.
- Correa J. (2011). Mapa de Unidades Geológicas, Esc: 1:50000. Proyecto: Microzonificación sísmica del Distrito Metropolitano de Quito: Estudio de amenaza local. Ejecutor: Evaluación de Riesgos Naturales para América Latina. Oficina de Seguridad y Gobernabilidad del Municipio del Distrito Metropolitano de Quito.

- Cosentino P., Ficarra V., Luzio D. (1977). Truncated Exponential Frequency-Magnitude Relationship in Earthquake Statistics. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 67: 1615-1623.
- D'Ercole R., Metzger P. (2004). La vulnerabilidad del Distrito Metropolitano de Quito. Impreso: Ekseption, Quito – Ecuador. 478 pp. ISBN: 9978-970-52-5.
- Del Pino y Yepes H. (1990). Apuntes para una historia sísmica de Quito. En: Centro Histórico de Quito, Problemática y Perspectivas. Dirección de Planificación del Ilustre Municipio de Quito, Ecuador. Fraga. 1: pp. 67-100.
- Egbue O. and Kellogg J. (2010). Pleistocene to Present North Andean “escape”. *Tectonophysics*. 489: 248-257. doi: 10.1016/j.tecto.2010.04.021.
- Egüez A., Alvarado A., Yepes H., Machette M., Costa C., Dart R. (2003). Database and Map of Quaternary faults and folds of Ecuador and its offshore regions, Open-File report 03-289. Sp. pub. USGS-International Lithosphere program. <http://www.usgs.gov>, (último acceso: enero 2015).
- Engdahl E. R. and Villaseñor A. (2002). Global Seismicity: 1900–1999. In: *International Handbook of Earthquake & Engineering Seismology*. Parte A. Editors: Lee W., Kanamori H., Jennings P., Kisslinger C. An Imprint of: Elsevier Science, USA. pp. 665-690. ISBN: 0-12-440652-1.
- ERN-AL (2012). Consorcio de Evaluación de Riesgos Naturales para América Latina. Informe: Microzonificación sísmica del Distrito Metropolitano de Quito: Estudio de la Amenaza sísmica a nivel local. Proyecto de Consultoría. Programa para la reducción de riesgos urbanos en el Distrito Metropolitano de Quito. 198 pp. más anexos.
- ESRI (2015). Environmental System Research Institute, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNESAirbus DS, USDA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community.
- FEMA 356 (2000). Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. Federal Emergency Management Agency, American Society of Civil Engineers, Washington, D. C., USA. 518 pp.
- FEMA 440 (2005). Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures. Applied Technology Council, California, Federal Emergency Management Agency, Washington, D. C., USA. 392 pp.
- Gardner J. K. and Knopoff L. (1974). Is the sequence of earthquakes in southern California, with aftershocks removed, Poissonian?. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 64 (5): 1363-1367.
- Geología y Física Marina y Terrestre del Ecuador (2009). Editores: Collot J., Sallares V., Pazmiño N. Impreso: Argudo & Asociados, Guayaquil-Ecuador. 281 pp. ISBN-978-9978-92-737-3.
- Goyes P. (2009). Fondos Marinos de Soberanía y Jurisdicción del Ecuador. En: *Geología y Geofísica Marina y Terrestre del Ecuador desde la Costa Continental hasta las Islas Galápagos*. Editores: Collot J. Y., Sallares V., Pazmiño N. Impreso: Argudo & Asociados, Guayaquil-Ecuador. pp. 131-149. ISBN: 978-9978-92-737-3.

- Gutscher M. A., Malavielli J., Lallemand S., Collot J. Y. (1999). Tectonic segmentation of the North Andean margin: impact of the Carnegie Ridge collision. *Earth and Planetary Science Letters*. 168: 255-270.
- Guillier B., Chatelain J. L., Jaillard E., Yepes H., Poupinet G., Fels J. F. (2001). Seismological evidence on the geometry of the Orogenic System in central-northern Ecuador (South America). *Geophysical Research Letters*. 28 (19): 3749-3752.
- Gutenberg B., Richter C. F. (1944). Frequency of earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 34: 185-188. PII: S0012-821X(99)00060-6.
- HAZUS (2003). Multi-hazard Loss Estimation Methodology. Technical Manual. Federal Emergency Agency, Washington, D. C., USA. 712 pp.
- Hayes G. P., Wald D. J., Johnson R. L. (2012). Slab1. 0: A three-dimensional model of global subduction zone geometries. *Journal of Geophysical Research*. 117: 1-15, doi: 10.1029/2011JB008524.
- Hanks T. C. and Kanamori H. (1979). A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research*. 84: 23480-23500. doi: 10.1029/2011JB008524.
- IGM (2013). Instituto Geográfico Militar. Atlas del Ecuador. <http://www.igm.gob.ec> (último acceso septiembre de 2015). 319 pp.
- IGEPN. Instituto Geofísico de la Politécnica Nacional de Quito-Ecuador. <http://www.igepn.edu.ec> (último acceso septiembre de 2015).
- INEC. Instituto Nacional de Estadística y Censos. <http://www.ecuadorencifras.gob.ec> (último acceso julio 2015).
- INIGEMM. Instituto Nacional de Investigación Geológico, Minero, Metalúrgico del Ecuador. <http://www.inigemmm.gob.ec> (último acceso septiembre de 2015).
- INOCAR. Instituto Oceanográfico de la Armada. <http://www.inocar.mil.ec> (último acceso agosto de 2015).
- ISC. International Seismological Centre. On-line Bulletin. Internatl. Seis. Cent., Thatcham, United Kingdom. <http://www.isc.ac.uk> (último acceso julio de 2014).
- Lagamarsino S. and Giovinazzi S. (2006). Macroseismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings. *Bull Earthquake Engineering*. 4:415-443. doi 10.1007/s10518-006-9024-z.
- López Arroyo A. y Villacañas J. (1999). Metodología simplificada para el análisis del riesgo sísmico.
- Manchuel K., Pontoise B., Béthoux N., Régnier M., Font Y., Sallares V., et al. (2009). Sismicidad e implicaciones estructurales en el área de Esmeraldas (Norte de Ecuador): a partir de los experimentos Sublime y Esmeraldas. En: *Geología y Geofísica Marina y Terrestre del Ecuador desde la Costa Continental hasta las Islas Galápagos*. Editores: Collot J. Y., Sallares V., Pazmiño N. Impreso: Argudo & Asociados, Guayaquil-Ecuador. pp. 167-179. ISBN-978-9978-92-737-3.
- Marcaillou B., Spence G., Collot J. Y., Wang K., Ribodetti A. (2009). Segmentación térmica del margen del Norte del Ecuador y del Sur de Colombia (1-4 N): su relación con la ubicación

de la zona sismogénica. En: Geología y Geofísica Marina y Terrestre del Ecuador desde la Costa Continental hasta las Islas Galápagos. Editores: Collot J. Y., Sallares V., Pazmiño N. Impreso: Argudo & Asociados, Guayaquil-Ecuador. pp. 180-202. ISBN-978-9978-92-737-3.

McVerry G., Zhao J., Abrahamson N., Somerville P. (2006). New Zealand Acceleration Response Spectrum Attenuation Relations for Crustal and Subduction Zone Earthquakes. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering. 39 (81): 1-58.

MDMQ. Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, <http://www.quito.gob.ec>, (último acceso agosto de 2015).

Michaud F., Pazmiño N., Collot J. Y. (2009). El karst submarino de mega depresiones circulares de la Cordillera de Carnegie (Ecuador): posible origen por disolución submarina. En: Geología y Geofísica Marina y Terrestre del Ecuador desde la Costa Continental hasta las Islas Galápagos. Editores: Collot J. Y., Sallares V., Pazmiño N. Impreso: Argudo & Asociados, Guayaquil-Ecuador. pp. 29-45. ISBN-978-9978-92-737-3.

Mouroux P. and Bun B. (2006). Presentation of RISK-UE Project. Bull Earthquake Engineering. 4: 323-339. doi: 10.1007/s10518-006-9020-3.

NEC (2011). Norma Ecuatoriana de la Construcción. Registro Oficial No. 413 del 10 de enero de 2015. <http://www.normaconstruccion.ec> (último acceso julio del 2015).

NEHRP (2003). National Earthquake Hazards Reduction Program. Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures. Part 1. Provisions. Building Seismic Safety Program, Washington, D. C. USA. 308 pp.

NEIC-PDE. National Earthquake Information Center Preliminary Determination of Epicenters. Epicenters (PDE) Bulletin. <http://earthquake.usgs.gov> (último acceso julio de 2014).

Nocquet J., Mothes P., Alvarado A. (2009). Geodesia, geodinámica y ciclo sísmico en Ecuador. En: Geología y Geofísica Marina y Terrestre del Ecuador desde la Costa Continental hasta las Islas Galápagos. Editores: Collot J. Y., Sallares V., Pazmiño N. Impreso: Argudo & Asociados, Guayaquil-Ecuador. pp. 29-45. ISBN-978-9978-92-737-3.

Nocquet J. M., Villegas-Lanza J. C., Chlieh M., Mothes P. A., Rolandone F., Jarrin P., Yepes, H. (2014). Motion of continental slivers and creeping subduction in the northern Andes. Nature Geoscience. 7: 287-291. doi: 10.1038/NCEO2099.

Norma E.030. "Diseño Sismorresistente". Contendida en el Reglamento Nacional de Edificaciones publicado con Decreto Supremo 011 de 2006. Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción del Gobierno del Perú. <http://www.sencico.gob.pe> (último acceso enero de 2015).

NSR-10. Reglamento Colombiano de la Construcción Sismorresistente, Cámara Colombiana de la Construcción. Decreto 926 del 19 de marzo de 2010. <http://www.camacol.co> (último acceso enero de 2015).

Ordaz M., Martinelli F., D'Amico V., Meletti C. (2013). CRISIS2008: A Flexible Tool to Perform Probabilistic Seismic Hazard Assessment. Seismological Research Letters. 84 (3): 495-504. doi: 10.17851/0220120067.

- Pazmiño N. y Michaud F. (2009). Descripción de los Sedimentos Marinos en la Cordillera Submarina de Carnegie. En: Geología y Geofísica Marina y Terrestre del Ecuador desde la Costa Continental hasta las Islas Galápagos. Editores: Collot J. Y., Sallares V., Pazmiño N. Impreso: Argudo & Asociados, Guayaquil-Ecuador. pp. 239-269. ISBN-978-9978-92-737-3.
- Pedoja K., Dumont J. F., Ortlieb L. (2009). Levantamiento Cuaternario costero del Arco de Talara (Ecuador y norte del Perú): cuantificaciones con las secuencias de terrazas marinas. En: Geología y Geofísica Marina y Terrestre del Ecuador desde la Costa Continental hasta las Islas Galápagos. Editores: Collot J. Y., Sallares V., Pazmiño N. Impreso: Argudo & Asociados, Guayaquil-Ecuador. pp. 107-129. ISBN-978-9978-92-737-3.
- Penington W. D. (1981). Subduction of the Eastern–Panama basin and seismotectonics of northwestern South America. *Journal of Geophysical Research*. 86: 10753-10770.
- Pontoise B. y Monfret T. (2004). Shallow seismogenic zone detected from an offshore-onshore temporary seismic network in the Esmeraldas area (Northern Ecuador). *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 5 (Q0209): 1-22. doi: 10.1029/2003Gc000561.
- Quirós L. (2011). Evaluación del Riesgo Sísmico en el Municipio de Almería. Tesis de Master, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, España. 208 pp.
- Ratzov G., Sosson M., Collot J. Y., Migeon S., Michaud F., López E., Le Gonidec Y. (2009). Deslizamientos submarinos a lo largo del Margen Convergente del Norte de Ecuador-Sur de Colombia. Posible control tectónico. En: Geología y Geofísica Marina y Terrestre del Ecuador desde la Costa Continental hasta las Islas Galápagos. Editores: Collot J. Y., Sallares V., Pazmiño N. Impreso: Argudo & Asociados, Guayaquil-Ecuador. pp. 75-82. ISBN-978-9978-92-737-3.
- Reasenberg P. (1985). Second Order Moment of Central California Seismicity, 1969-1982. *Journal of Geophysical Research*. 90: 5479-5495.
- RISK-UE (2003). An advanced approach to Earthquake ground motions scenarios with applications to different European towns. European commission 5FP-City of Tomorrow and Cultural Heritage. WP2- Basis of a handbook of earthquake ground motions scenarios. CEC Contract Number: EVK4-CT-2000-00014. 99 pp.
- Rivadeneira F., Segovia M., Alvarado A., Egred J., Troncoso L., Vaca S., et al. (2007). Breves fundamentos sobre los terremotos en el Ecuador. Instituto Geofísico Escuela Politécnica Nacional, Quito - Ecuador. Corporación Editora Nacional, Ecuador. pp. 33-45. ISBN: 978-9978-84-460-1.
- Sallarés V., Charvis P., Calahorrano A. (2009). Naturaleza y formación de la Provincia Volcánica de Galápagos. En: Geología y Geofísica Marina y Terrestre del Ecuador desde la Costa Continental hasta las Islas Galápagos. Editores: Collot J. Y., Sallares V., Pazmiño N. Impreso: Argudo & Asociados, Guayaquil-Ecuador. pp. 203-220. ISBN-978-9978-92-737-3.
- Segovia M. y Alvarado A. (2009). Breve análisis de la sismicidad y del campo de esfuerzos en el Ecuador. En: Geología y Geofísica Marina y Terrestre del Ecuador desde la Costa

- Continental hasta las Islas Galápagos. Editores: Collot J. Y., Sallares V., Pazmiño N. Impreso: Argudo & Asociados, Guayaquil-Ecuador. pp. 131-149. ISBN-978-9978-92-737-3.
- SNGR (2013). Secretaría Nacional de gestión del riesgo. Ecuador: Referencias Básicas para la Gestión de Riesgos. Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos/Departamento de Ayuda Humanitaria y Protección Civil de la Unión Europea/Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres. <http://riesgos.gob.ec> (último acceso septiembre de 2015). 236 pp.
- Stepp J. C. (1973). Analysis of completeness of the earthquake simple in the Puget Sound area and its effects on statistical estimates of earthquake hazard. En S. T. Harding (Editor). Contributions to Seismic zoning, U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration Technical Report ERL 267-ESL 30, Washington, D.C. pp. 16-28.
- Stirling M., Rhoades D., Berryman K. (2002). Comparison of earthquake scaling relations derived from data of the instrumental and preinstrumental era. Bulletin of the Seismological Society of America. 92 (2): 812-830.
- Trenkamp R., Kellogg J. N., Freymuller J. T., Mora H. P. (2002). Wide plate margin deformation, South Central America and Northwestern South America, CASA GPS observations. Journal of South American Earth Sciences. 15: 157–171. PII: S0895-9811(02)00018-4.
- UNRO (1979). United Nations Disaster Relief Organization. Natural Disasters and Vulnerability Analysis. Report of Expert Group Meeting.
- Utsu T. (2002). Relationships between magnitude scales. In: International Handbook of Earthquake & Engineering Seismology. Part A. Editors: Lee W., Kanamori H., Jennings P., Kisslinger C. An Imprint of: Elsevier Science, USA. pp. 733-746. ISBN: 0-12-440652-1.
- Vaca S., Régnier M., Bethoux N., Álvarez V., Pontoise B. (2009). Sismicidad de la región de Manta: Enjambre sísmico de Manta-2005. En: Geología y Geofísica Marina y Terrestre del Ecuador desde la Costa Continental hasta las Islas Galápagos. Editores: Collot J. Y., Sallares V., Pazmiño N. Impreso: Argudo & Asociados, Guayaquil-Ecuador. pp. 151-166. ISBN-978-9978-92-737-3.
- Vacreanu R., Lungu D., Aldea A., Arion C. (2003). WP07 Report. Seismic Risk Scenarios Handbook. Risk-UE Project, Bucarest. pp. 18.
- Valverde J., Fernández J., Jiménez E., Vaca. T., Alarcón F. (2002). Microzonificación sísmica de los suelos del Distrito Metropolitano de la ciudad de Quito. Proyecto Convenio de la Escuela Politécnica Nacional - Municipio del Distrito Metropolitano de Quito. 146 pp. más anexos.
- Vera R. (2013). Geology of Ecuador. Gráficas Iberia, Quito-Ecuador. ISBN 978-9942-11-865-3.
- Weichert D. (1980). Estimation of the Earthquake recurrence parameters for unequal observation periods for different magnitudes. Bulletin of the Seismological Society of America. 70 (4): 1337-1346.
- Witt C., Bourgois J., Michaud F., Ordoñez M., Jiménez N., Sasson M. (2006). Development of the Gulf of Guayaquil (Ecuador) during the Quaternary as an effect of the Nort Andan block tectonic escape. Tectonics. 25 (TC3017): 1-22. doi: 10.1029/2004TC001723.

- Witt C. y Bourgois J. (2009). Relaciones entre la evolución de la cuenca del Golfo de Guayaquil-Tumbes y el escape del Bloque Nor-Andino. En: Geología y Geofísica Marina y Terrestre del Ecuador desde la Costa Continental hasta las Islas Galápagos. Editores: Collot J. Y., Sallares V., Pazmiño N. Impreso: Argudo & Asociados, Guayaquil-Ecuador. pp. 95-106. ISBN-978-9978-92-737-3.
- Youngs R., Chiou S., Silva W., Humphrey J. (1997). Strong Ground Motion Attenuation Relationships for Subduction Zone Earthquakes. *Seismological Research Letters*. 68 (1): 58-73.
- Zamora A. y Litherland M. (1993). Mapa Geológico de la República del Ecuador; Esc. 1:1'000.000. Corporación de Desarrollo e Investigación Geológico Minero-Metalúrgico y Misión Geológica Británica-British Geological Survey. En proceso de actualización, entregado para este estudio por el Instituto Nacional Geológico Minero Metalúrgico del Ecuador, el 21 de marzo del 2014.
- Zhao J., Zhang J., Asano A., et al. (2006). Attenuation Relations of Strong Ground Motion in Japan Using Site Classification Base don Predominant Period. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 96 (3): 898-913. doi: 10.1785/0120050122.

## ÍNDICE DE FIGURAS.

<b>Figura 1.1:</b> Ubicación regional del Ecuador.....	5
<b>Figura 1.2:</b> Fotografías de Quito luego del terremoto de 1859.....	7
<b>Figura 1.3:</b> Fotografías de Quito luego del terremoto de 1968.....	7
<b>Figura 2.1:</b> Factores que intervienen en la evaluación de la peligrosidad sísmica.....	15
<b>Figura 2.2:</b> Esquema que representa el proceso de cálculo de la peligrosidad.....	19
<b>Figura 2.3:</b> Determinación del espectro UHS, a partir de la probabilidad anual de excedencia.....	20
<b>Figura 2.4:</b> Representación de la peligrosidad por medio de mapas de isolíneas.....	20
<b>Figura 2.5:</b> Delimitación del sismo de control.....	21
<b>Figura 2.6:</b> Fases en la confección del Catálogo de Proyecto.....	22
<b>Figura 2.7:</b> Análisis de completitud y determinación del número teórico de sismos.....	23
<b>Figura 2.8:</b> Envoltentes propuestas por Gardner y Knopoff (1974) para el análisis de réplicas.....	23
<b>Figura 2.9:</b> Recta de Gutenberg y Richter con doble truncamiento.....	25
<b>Figura 2.10:</b> Esquema que representa la información geofísica y tectónica que se considera para la delimitación de zonas sismogénicas de corteza .....	26
<b>Figura 2.11:</b> Distancia Fuente-Emplazamiento.....	27
<b>Figura 2.12:</b> Esquema que representa la estimación del efecto local .....	28
<b>Figura 2.13:</b> Esquema general de un árbol lógico para la estimación de la amenaza sísmica .....	29
<b>Figura 2.14:</b> Esquema de las fases de cálculo del riesgo.....	32
<b>Figura 2.15:</b> Esquema general del escenario sísmico.....	33
<b>Figura 2.16:</b> Ejemplos de curvas de capacidad tomadas de HAZUS (2003).....	35
<b>Figura 2.17:</b> Ejemplo de curvas de fragilidad, en donde se representan los estados de daño.....	35
<b>Figura 2.18:</b> Representación del Método Capacidad Espectro.....	37
<b>Figura 2.19:</b> Esquema de desarrollo del Método Coeficiente de Desplazamiento.....	37
<b>Figura 2.20:</b> Esquema que representa la estimación del grado de daño en edificaciones.....	39
<b>Figura 3.1:</b> Vectores de velocidad en la línea de costa Colombo-ecuatoriana.....	43
<b>Figura 3.2:</b> Representación de los Territorios Tectónicos.....	44
<b>Figura 3.3:</b> Características Tectónicas de la placa de Nazca.....	46
<b>Figura 3.4:</b> Perfiles de la fosa de subducción frente a las costas del Ecuador.....	47
<b>Figura 3.5:</b> Características dominantes en la fosa de subducción.....	49
<b>Figura 3.6:</b> Esquema que muestra el ángulo de inclinación del slab de la placa oceánica en los segmentos Norte y Sur, según Guillier et al. (2001).....	50
<b>Figura 3.7:</b> Esquema que representa el buzamiento en dirección Este de la placa oceánica propuesto por Trenkamp et al., (2002), en el corte transversal A-A' .....	50
<b>Figura 3.8:</b> Esquema que representa el buzamiento en dirección Este de la placa de Nazca, mostrado por Penington (1981).....	51
<b>Figura 3.9:</b> Esquema que representa la inclinación del slab planteada por Manchuel et al. (2009).....	51
<b>Figura 3.10:</b> Esquema que representa el ángulo de inclinación del techo de la placa oceánica expuesto por Pontoise y Manfret (2004).....	51
<b>Figura 3.11:</b> Esquema que representa la inmersión del plano de Benioff propuesto por Chunga et al., (2009).....	52
<b>Figura 3.12:</b> Modelo de la geometría de la zona de subducción realizada por Hayes et al., (2012), mediante el uso de curvas de nivel en profundidad.....	52

<b>Figura 3.13:</b> Representación del límite del Bloque Norandino y fallas cuaternarias activas Egüez et al. 2003).....	53
<b>Figura 3.14:</b> Representación de las Provincias Geológicas.....	55
<b>Figura 3.15:</b> Regiones naturales del Ecuador.....	56
<b>Figura 3.16:</b> Características físicas dominantes de la Región Costa.....	57
<b>Figura 3.17:</b> Distribución de estratovolcanes cuaternarios.....	58
<b>Figura 4.1:</b> Fuentes identificadas de actividad sísmica.....	65
<b>Figura 4.2:</b> Esquema de trabajo para la elaboración del Catálogo Sísmico de Proyecto...	66
<b>Figura 4.3:</b> Red sismológica RENSIG perteneciente al IGEPN.....	67
<b>Figura 4.4:</b> Representación de los registros sísmicos instrumentales consultados.....	69
<b>Figura 4.5:</b> Relación entre $M_w$ con $m_{bISC}$ y $m_{bPDE}$ .....	70
<b>Figura 4.6:</b> Relación entre $M_w$ con $M_{SISC}$ y $M_{SPDE}$ .....	71
<b>Figura 4.7:</b> Representación del Catálogo Sísmico.....	74
<b>Figura 4.8:</b> Distribución de la sismicidad del Catálogo Sísmico.....	75
<b>Figura 4.9:</b> Límites superiores en Distancia y Tiempo para delimitar las ventanas en las cuales se localizan las réplicas de un sismo principal.....	77
<b>Figura 4.10:</b> Análisis de completitud de sismos corticales.....	78
<b>Figura 4.11:</b> Análisis de completitud de sismos de subducción.....	79
<b>Figura 4.12:</b> Esquema de trabajo para la propuesta de un modelo de zonas sismogénicas para el cálculo de la peligrosidad sísmica.....	80
<b>Figura 4.13:</b> Propuestas de zonificaciones para régimen cortical.....	82
<b>Figura 4.14:</b> Propuestas de zonificaciones para subducción interfase.....	82
<b>Figura 4.15:</b> Propuestas de zonificaciones para subducción intrepelaca.....	83
<b>Figura 4.16:</b> Zonificación cortical, propuesta para el cálculo de la peligrosidad sísmica en el presente estudio.....	85
<b>Figura 4.17:</b> Representación de la zonificación ubicada en la Región Costa.....	87
<b>Figura 4.18:</b> Representación de la zonificación ubicada en la Cordillera de los Andes.....	88
<b>Figura 4.19:</b> Representación de la zonificación ubicada en la Región Interandina.....	89
<b>Figura 4.20:</b> Representación de la zonificación ubicada en la Región Oriental.....	91
<b>Figura 4.21:</b> Representación de la geometría de la zona de subducción propuesta en el presente estudio mediante el uso de curvas de nivel en profundidad.....	93
<b>Figura 4.22:</b> Representación del corte transversal AA', ubicado en la Figura 4.21.....	94
<b>Figura 4.23:</b> Representación del corte transversal BB', ubicado en la Figura 4.21.....	94
<b>Figura 4.24:</b> Representación de las zonas sismogénicas de subducción.....	96
<b>Figura 4.25:</b> Ajustes al modelo de Gutenberg-Richter, donde los parámetros $\alpha$ y $\beta$ son obtenidos con la metodología de Máxima Verosimilitud.....	97
<b>Figura 4.26:</b> Ejemplos de los procedimientos seguidos para la estimación de la magnitud máxima.....	100
<b>Figura 4.27:</b> Ramas del nodo del arbol lógico para capturar la incertidumbre inherente a los modelos de atenuación y pesos asignados.....	103
<b>Figura 4.28:</b> Esquema para la estimación de la peligrosidad.....	104
<b>Figura 4.29:</b> Mapas de peligrosidad sísmica del Ecuador en términos de PGA obtenidos en éste estudio, para períodos de retorno a) 475 años, b) 975 años, y c) 2475 años.....	106
<b>Figura 4.30:</b> Mapas de peligrosidad sísmica del Ecuador en términos de SA (1s) obtenidos en éste estudio para períodos de retorno de a) 475 años, b) 975 años y c) 2475 años.....	107
<b>Figura 4.31:</b> Curvas de peligrosidad para las ciudades de a) Esmeraldas, b) Quito, c) Guayaquil y d) Loja, en términos de PGA y SA (T) en (g), para T = 0.1, 0.2, 0.5, 1 y 2 s....	108
<b>Figura 4.32:</b> Espectros de peligrosidad uniforme obtenidos en cuatro ciudades del Ecuador para períodos de retorno de 475, 975 y 2475 años.....	109

<b>Figura 4.33:</b> Resultados de la desagregación de la peligrosidad. Se representan las contribuciones de los pares (Mw, R) al movimiento objeto dado por PGA para un período de retorno de 475 años.....	110
<b>Figura 4.34:</b> Resultados de la desagregación de la peligrosidad. Se representan las contribuciones de los pares (Mw, R) al movimiento objeto dado por SA (1s) para un período de retorno de 475 años.....	110
<b>Figura 5.1:</b> Organización del sistema de información geográfica.....	118
<b>Figura 5.2:</b> Integración de la información gráfica y alfanumérica.....	119
<b>Figura 5.3:</b> Distribución administrativa del Ilustre Municipio de Quito organizada por capas de información.....	120
<b>Figura 5.4:</b> Distribución espacial de las edificaciones de uso residencial según el material utilizado en sus estructuras.....	121
<b>Figura 5.5:</b> Distribución espacial de las edificaciones de uso residencial según el material utilizado en su cerramiento.....	121
<b>Figura 5.6:</b> Distribución espacial de las edificaciones de uso residencial según el estado de conservación de las edificaciones .....	122
<b>Figura 5.7:</b> Distribución de las edificaciones por período de construcción.....	123
<b>Figura 5.8:</b> Representación del sistema de fallas activas de Quito.....	125
<b>Figura 5.9:</b> Representación de la ubicación de la Parroquia Mariscal Sucre en relación al plano del segmento de falla Ilumbisí La Bota.....	126
<b>Figura 5.10:</b> Representación de la distancia desde el sitio donde se calcula el riesgo al plano de ruptura de la fuente.....	127
<b>Figura 5.11:</b> Representación de la Parroquia Mariscal Sucre en relación a zonas dinámicamente homogéneas y Mapa de Unidades Geológicas .....	128
<b>Figura 5.12:</b> Representación de los espectros de respuesta, para el escenario sísmico definido, en los tres barrios objeto de estudio .....	129
<b>Figura 5.13:</b> Esquema de trabajo para la identificación de tipologías constructivas en Mariscal Sucre .....	129
<b>Figura 5.14:</b> Distribución de Edificaciones de uso residencial en la Parroquia Mariscal Sucre .....	131
<b>Figura 5.15:</b> Curvas de capacidad desarrolladas en HAZUS (2003) para estructuras de hormigón armado C1, de altura L (1-3 pisos) y nivel de diseño _high, _mod, _low, y _pre.....	135
<b>Figura 5.16:</b> Curvas de capacidad desarrollados en HAZUS (2003) para estructuras de hormigón armado C1, de altura M (4-7 pisos) y nivel de diseño _high, _mod, _low, y _pre.....	136
<b>Figura 5.17:</b> Curvas de capacidad desarrolladas en HAZUS (2003) para estructuras de hormigón armado C3, de altura H (4-7 pisos) y nivel de diseño _low, y _pre.....	136
<b>Figura 5.18:</b> Curvas de capacidad desarrolladas en HAZUS (2003) para estructuras de acero S1, de altura L (1-3 pisos) y nivel de diseño _high.....	136
<b>Figura 5.19:</b> Curvas de capacidad desarrolladas en HAZUS (2003) para estructuras de acero S1, de altura M (4-7 pisos) y nivel de diseño _high, y _mod.....	137
<b>Figura 5.20:</b> Curvas de capacidad desarrolladas en HAZUS (2003) para estructuras de acero S3, para todas las alturas y nivel de diseño _high, _mod, _low, y _pre.....	137
<b>Figura 5.21:</b> Curvas de capacidad desarrolladas en HAZUS (2003) para estructuras de acero S4, de altura H ( $\geq 8$ pisos) y nivel de diseño _high.....	137
<b>Figura 5.22:</b> Curvas de capacidad desarrolladas en HAZUS (2003) para estructuras de mampostería no reforzada (URM), de altura L (1-2 pisos) y nivel de diseño _low y _pre.....	138
<b>Figura 5.23:</b> Curvas de capacidad desarrolladas en HAZUS (2003) para estructuras de mampostería no reforzada (URM), de altura M ( $\geq 3$ pisos) y nivel de diseño _low y	138

_pre.....	
<b>Figura 5.24:</b> Curvas de capacidad desarrolladas en HAZUS (2003) para estructuras de madera W1, de altura de 1-2 pisos y nivel de diseño _high, _mod, _low y _pre.....	138
<b>Figura 5.25:</b> Curvas de capacidad desarrolladas en HAZUS (2003) para estructuras de madera W2, para todas las alturas y nivel de diseño _pre.....	139
<b>Figura 5.26:</b> Representación de las aceleraciones Au y Ay para las tipologías del estudio.....	139
<b>Figura 5.27:</b> Relación entre los desplazamientos últimos y de fluencia de cada tipología.....	140
<b>Figura 5.28:</b> Representación del período natural por tipología constructiva.....	140
<b>Figura 5.29:</b> Representación de las curvas de capacidad y demanda para las tipologías a) C1M_mod y b) C1L_low, del Barrio La Colón.....	141
<b>Figura 5.30:</b> Curvas de fragilidad para las tipologías de Hormigón Armado.....	145
<b>Figura 5.31:</b> Estimación de la probabilidad de daño para las estructuras de acero del barrio La Colón.....	146
<b>Figura 5.32:</b> Estados de daño por tipología en el barrio La Colón.....	149
<b>Figura 5.33:</b> Estados de daño por tipología en el barrio La Floresta.....	149
<b>Figura 5.34:</b> Estados de daño por tipología en el barrio Mariscal Sucre.....	150
<b>Figura 5.35:</b> Distribución del estado de daño Moderado en cada barrio.....	151
<b>Figura 5.36:</b> Distribución del estado de daño Extenso en cada barrio.....	152
<b>Figura 5.37:</b> Distribución del estado de daño Completo en cada barrio.....	153
<b>Figura 5.38:</b> Número de edificaciones de uso residencial por estado de daño en el barrio La Colón.....	157
<b>Figura 5.39:</b> Número de edificaciones de uso residencial por estado de daño en el barrio La Floresta.....	158
<b>Figura 5.40:</b> Número de edificaciones de uso residencial por estado de daño en el barrio Mariscal Sucre.....	158
<b>Figura 5.41:</b> Cantidad de edificaciones de hormigón armado por estado de daño en la Parroquia Mariscal Sucre.....	159
<b>Figura 5.42:</b> Cantidad de edificaciones de marcos de acero por estado de daño en la Parroquia Mariscal Sucre.....	159
<b>Figura 5.43:</b> Cantidad de edificaciones de mampostería sin reforzar por estado de daño en la Parroquia Mariscal Sucre.....	159
<b>Figura 5.44:</b> Cantidad de edificaciones de marcos de madera por estado de daño en la Parroquia Mariscal Sucre.....	159
<b>Figura 5.45:</b> Número de edificaciones con riesgo de habitabilidad en función del daño esperado, estimadas con las relaciones propuestas por Coburn et al. (1992) y Vacareanu et al. (2004).....	160

## ÍNDICE DE TABLAS.

<b>Tabla 4.1:</b> Resumen de los eventos sísmicos consultados en los catálogos del IGEPN, RISCIB, ISCB Y NEIC-PDE .....	68
<b>Tabla 4.2:</b> Catálogo histórico del proyecto, generado a partir de estudios y reportes específicos.....	73
<b>Tabla 4.3:</b> Resumen de eventos del Catálogo Sísmico agrupados por régimen tectónico.....	74
<b>Tabla 4.4:</b> Porcentaje de réplicas y terremotos principales en el Catálogo Sísmico.....	77
<b>Tabla 4.5:</b> Años de referencia que establecen los períodos de completitud para diferentes intervalos de magnitud.....	79
<b>Tabla 4.6:</b> Distribución de la Mmax para las fuentes sismogénicas.....	101
<b>Tabla 4.7:</b> Parámetros de Sismicidad.....	102
<b>Tabla 4.8:</b> Ecuaciones de predicción del movimiento del suelo.....	103
<b>Tabla 4.9:</b> Datos geográficos y poblacionales de las ciudades de estudio.....	108
<b>Tabla 4.10:</b> Resultado de la Desagregación / Terremotos de Control.....	111
<b>Tabla 4.11:</b> Valores de PGA (g) para las ciudades del estudio.....	112
<b>Tabla 5.1:</b> Descripción del código catastral.....	119
<b>Tabla 5.2:</b> Parámetros que caracterizan los segmentos que conforman el Sistema de fallas Quito.....	124
<b>Tabla 5.3:</b> Parámetros geométricos de la falla Ilumbisí la Bota.....	126
<b>Tabla 5.4:</b> Ubicación geográfica del Plano de Falla, coordenadas UTM.....	126
<b>Tabla 5.5:</b> Valores de aceleración (g) que configuran los espectros de respuesta, para el escenario sísmico definido, en los tres barrios de estudio.....	128
<b>Tabla 5.6:</b> Clasificación de vulnerabilidad adoptada, según HAZUS (2003) sin considerar el nivel de diseño.....	132
<b>Tabla 5.7:</b> Definición del nivel de diseño.....	133
<b>Tabla 5.8:</b> Clases de vulnerabilidad identificadas para el presente estudio.....	134
<b>Tabla 5.9:</b> Parámetros de las curvas de capacidad para cada clase de vulnerabilidad....	135
<b>Tabla 5.10:</b> Valores deducidos por el Método de Coeficiente de Desplazamiento Mejorado para las diferentes clases de vulnerabilidad del Barrio La Colón.....	142
<b>Tabla 5.11:</b> Valores deducidos por el Método de Coeficiente de Desplazamiento Mejorado para las diferentes clases de vulnerabilidad del Barrio La Floresta.....	142
<b>Tabla 5.12:</b> Valores deducidos por el Método de Coeficiente de Desplazamiento Mejorado para las diferentes clases de vulnerabilidad del Barrio Mariscal Sucre.....	143
<b>Tabla 5.13:</b> Parámetros de las curvas de fragilidad (HAZUS, 2013).....	144
<b>Tabla 5.14:</b> Probabilidades de alcanzar o exceder cada estado de daño para cada clase de vulnerabilidad en el barrio La Colón.....	147
<b>Tabla 5.15:</b> Probabilidades de alcanzar o exceder cada estado de daño para cada clase de vulnerabilidad en el barrio Mariscal Sucre.....	147
<b>Tabla 5.16:</b> Probabilidades de alcanzar o exceder cada estado de daño para cada clase de vulnerabilidad en el barrio La Floresta.....	148
<b>Tabla 5.17:</b> Cálculo del número de edificaciones por estado de daño y tipología (La Colón).....	155
<b>Tabla 5.18:</b> Cálculo del número de edificaciones por estado de daño y tipología (Mariscal Sucre).....	156
<b>Tabla 5.19:</b> Cálculo del número de edificaciones por estado de daño y tipología (La Floresta).....	157



**ANEXOS.**



## ANEXO 1

### (CAPÍTULO 4: AJUSTE Y PARÁMETROS DE SISMICIDAD)

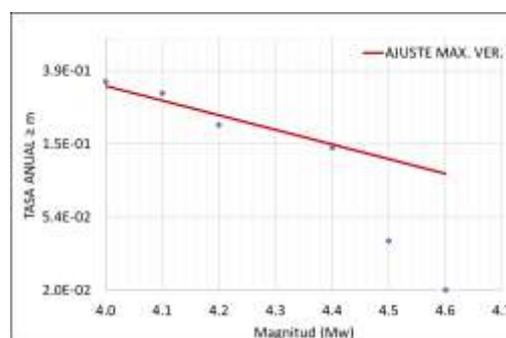
#### SIMBOLOGÍA:

**AJUSTE MAX. VER.:** Ajuste de máxima verosimilitud

#### ZONAS CORTICAL:

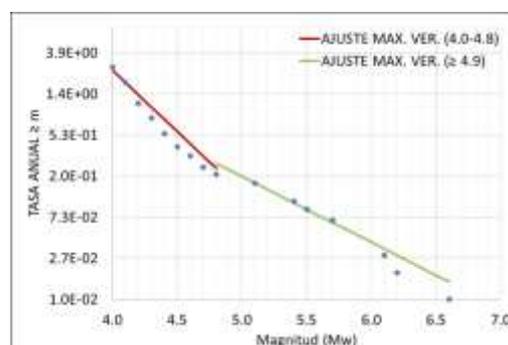
##### COSTA 1 (C1):

Alfa	10.744
Beta	-1.988
Sigma(Alfa)	0.000
Sigma(Beta)	1.645
TASA 4.0	0.320



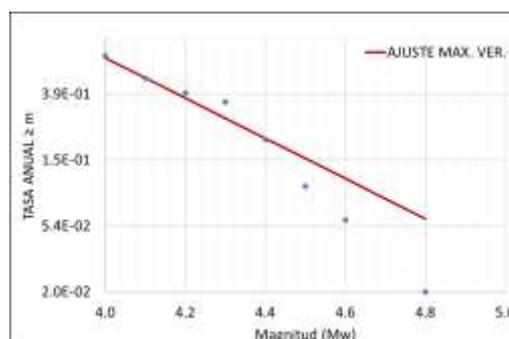
##### COSTA 2 (C2):

AJUSTE (4.0-4.8)		AJUSTE (≥ 4.9)	
Alfa	17.416	Alfa	10.958
Beta	-2.960	Beta	-1.590
Sigma(Beta)	0.291	Sigma(Beta)	0.704
Na (4.0)	2.539	Na (4.9)	0.268



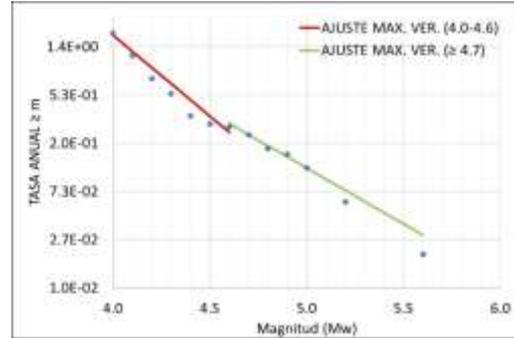
##### COSTA 3 (C3):

Alfa	15.648
Beta	-3.027
Sigma(Beta)	0.949
TASA 4.0	0.677



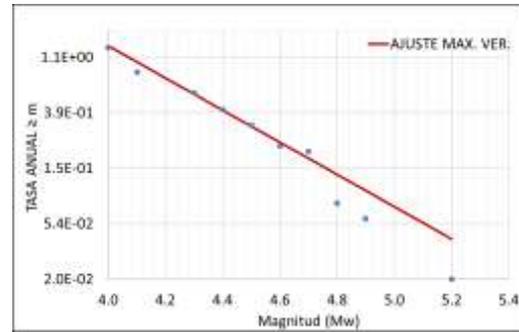
**COSTA 4 (C4):**

AJUSTE (4.0-4.6)		AJUSTE ( $\geq 4.7$ )	
Alfa	17.853	Alfa	13.295
Beta	-3.330	Beta	-2.300
Sigma(Beta)	0.428	Sigma(Beta)	1.138
Na (4.0)	1.823	Na (4.7)	0.235



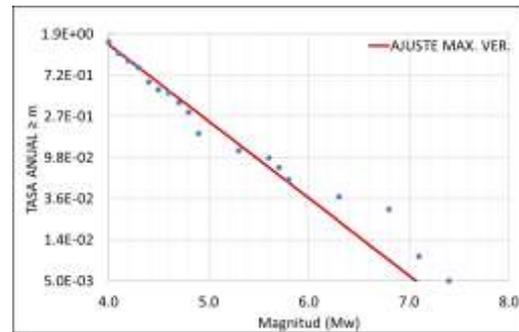
**CORDILLERA OCCIDENTAL (CO1):**

Alfa	15.720
Beta	-2.881
Sigma(Alfa)	0.000
Sigma(Beta)	0.520
TASA 4.0	1.308



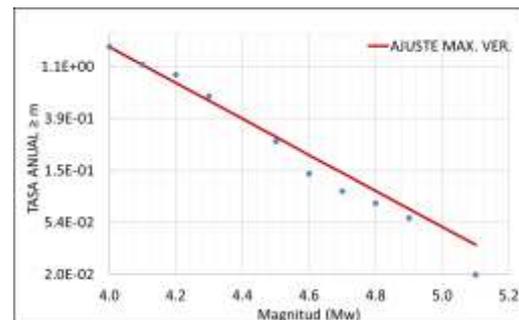
**CORDILLERA REAL 1 (CR1):**

Alfa	13.250
Beta	-1.859
Sigma(Alfa)	0.000
Sigma(Beta)	0.206
TASA 4.0	1.514



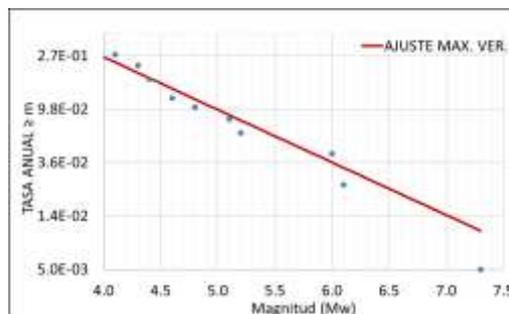
**CORDILLERA REAL 2 (CR2):**

Alfa	18.156
Beta	-3.446
Sigma(Beta)	0.544
TASA 4.0	1.553



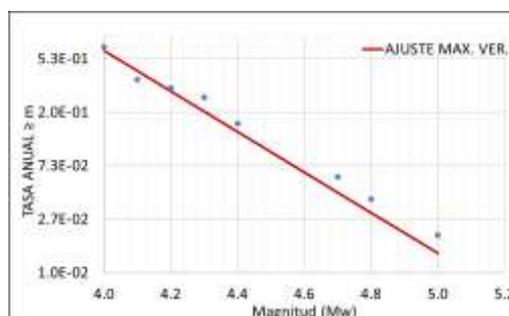
**REGIÓN INTERANDINA 1 (RI1):**

Alfa	7.959
Beta	-0.978
Sigma(Alfa)	0.000
Sigma(Beta)	0.306
TASA 4.0	0.258



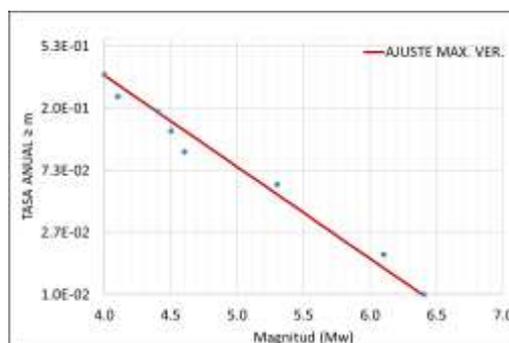
**REGIÓN INTERANDINA 2:**

Alfa	18.516
Beta	-3.766
Sigma(Beta)	0.948
TASA 4.0	0.618



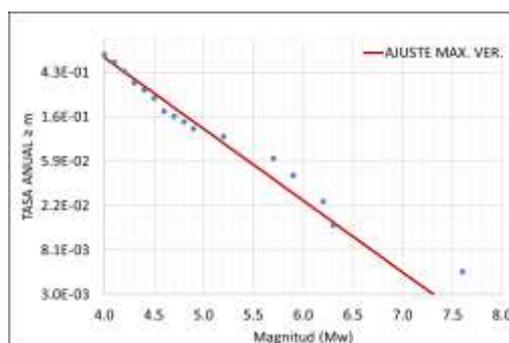
**REGIÓN INTERANDINA 3 (RI3):**

Alfa	9.414
Beta	-1.467
Sigma(Beta)	0.466
TASA 4.0	0.334



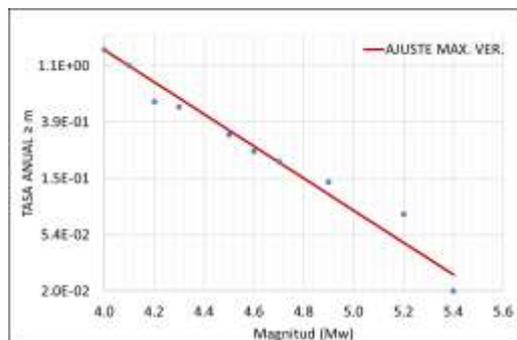
**REGIÓN INTERANDINA 4 (RI4):**

Alfa	11.293
Beta	-1.601
Sigma(Beta)	0.269
TASA 4.0	0.602



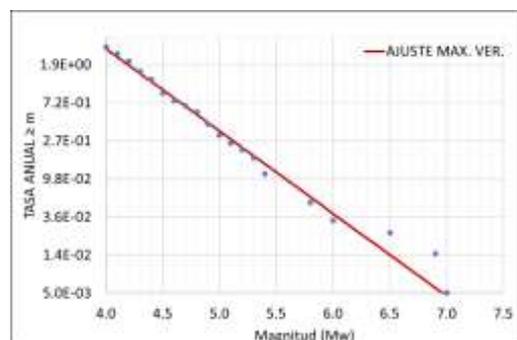
**REGIÓN ORIENTAL 1 (RO1):**

Alfa	15.588
Beta	-2.830
Sigma(Beta)	0.463
TASA 4.0	1.398



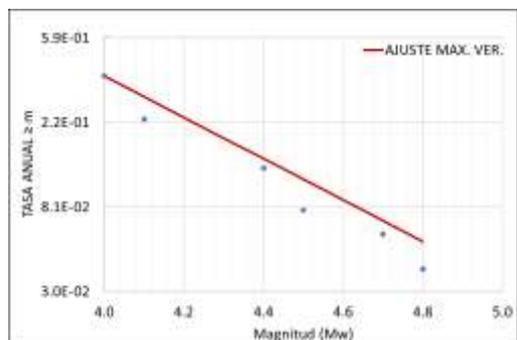
**REGIÓN ORIENTAL 2 (RO2):**

Alfa	15.086
Beta	-2.152
Sigma(Beta)	0.185
TASA 4.0	2.946



**REGIÓN AMAZÓNICA 1 (A1):**

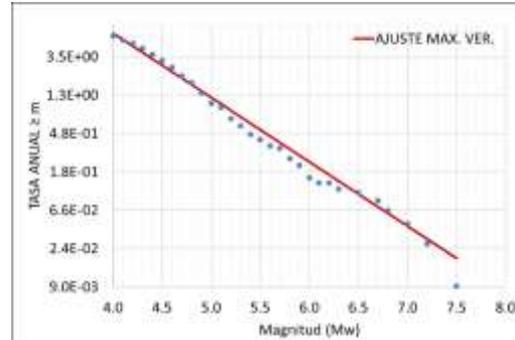
Alfa	12.678
Beta	-2.430
Sigma(Beta)	1.209
TASA 4.0	0.378



## ZONAS IN-SLAB:

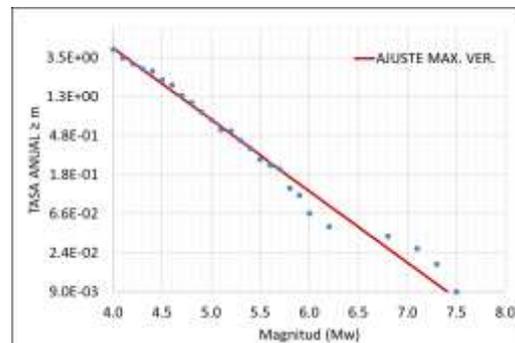
### IN-SLAB SUR (ISS):

Alfa	13.209
Beta	-1.665
Sigma(Beta)	0.094
TASA 4.0	6.414



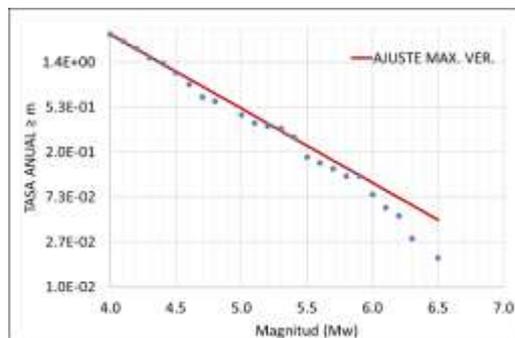
### IN-SLAB SUR CENTRO (ISSC):

Alfa	13.465
Beta	-1.821
Sigma(Beta)	0.123
TASA:	4.441



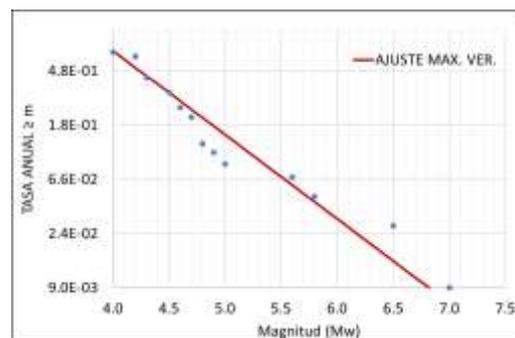
### IN-SLAB NORTE CENTRO (ISNC):

Alfa	12.179
Beta	-1.640
Sigma(Beta)	0.171
TASA 4.0:	2.653



### IN-SLAB NORTE (ISN):

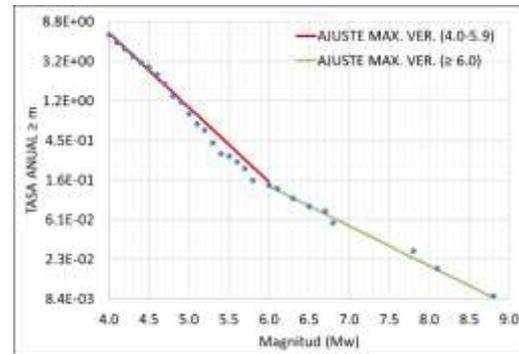
Alfa	10.487
Beta	-1.541
Sigma(Beta)	0.286
TASA 4.0:	0.690



## ZONAS INTERFASE:

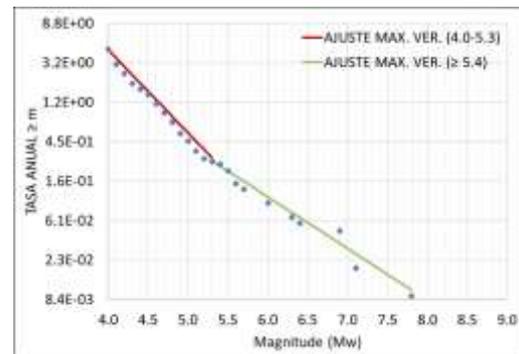
### ZONA INTERFASE NORTE (IFN):

AJUSTE (4.0-5.9)		AJUSTE ( $\geq 6.0$ )	
ALFA	14.059	ALFA	8.739
BETA	-1.87	BETA	-1.000
SIGMA BETA	0.099	SIGMA BETA	0.370
TASA 4.0	6.609	TASA 6.0	0.142



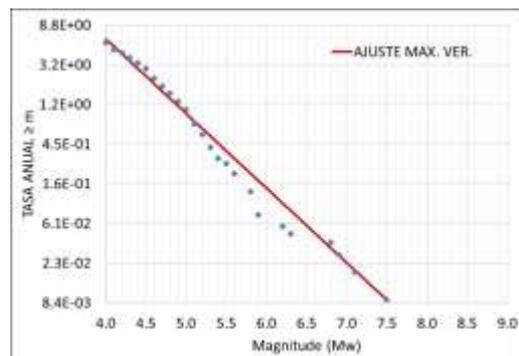
### ZONA INTERFASE CENTRO (IFC):

AJUSTE (4.0-5.3)		AJUSTE ( $\geq 5.4$ )	
TASA 4.0:	4.479	TASA 5.4:	0.2413
ALFA	14.551	ALFA	10.2897
BETA	-2.09	BETA	-1.3
SIGMA BETA	0.141	SIGMA BETA	0.392



### INTERFASE SUR (IFS):

Alfa	13.994
Beta	-1.869
Sigma(Beta)	0.107
TASA 4.0	6.205



## ANEXO 2

### (CAPÍTULO 4: ESTIMACIÓN DE LA MAGNITUD MÁXIMA)

#### a) EN ZONAS CORTICALES POR GEOLOGÍA

**Fuente de información:**

**Fallas:** Egüez et al., (2003); Chunga K., (2010).

**Simbología:**

**ID.:** Identificador de la Falla

**ZONA:** Zona a la que pertenece la estructura

**Mmax. Obs. ZONA (Mw):** magnitud máxima observada en la zona; el parámetro de medida es magnitud momento.

**LONGITUD (km):** longitud del segmento de falla en kilómetros.

**STIRLING 2001:** resultado de la estimación de la Mw, que se puede esperar como consecuencia de la ruptura de la estructura, aplicando las correlaciones propuestas por Stirling et al., (2002) ( $M_w = 5.45 + 0.95 \log(L)$ ).

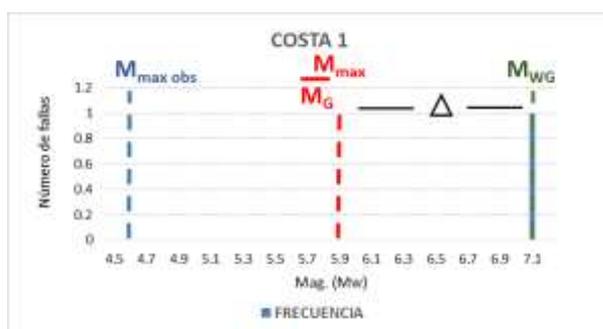
**Mmed:** magnitud media

**COSTA 1 (C1):**

ID.	FALLA NÚMERO	NOMBRE ESTRUCTURA	ZONA	Mmax. Obs. ZONA (Mw)	LONGITUD (km)	STIRLING 2002
9	CO-42	C-02	C1	4.6	58.2	7.1

Mmed    5.9

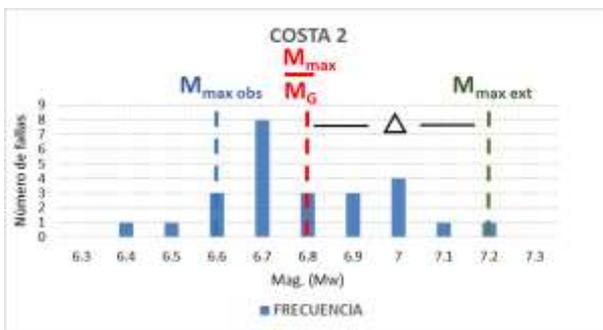
DELTA    1.2



**COSTA 2 (C2):**

ID.	FALLA NÚMERO	NOMBRE ESTRUCTURA	ZONA	Mmax. Obs. ZONA (Mw)	LONGITUD (km)	STIRLING 2002
55	Ec 7b	Falla Cañaverl (Sección central)	C2	6.6	34.2	6.9
59	Ec 2b	Falla Esmeraldas (Secc Sur)	C2	6.6	41.1	7.0
104	Ec 16d	Falla Colonche (Secc Sureste)	C2	6.6	32.1	6.9
105	Ec 16b	Falla Colonche (Secc Norte)	C2	6.6	22.8	6.7
60	Ec 2a	Falla Esmeraldas (Secc Norte)	C2	6.6	21.3	6.7
103	Ec 16c	Falla Colonche (Secc Centro)	C2	6.6	20.9	6.7
110	Ec 11	Falla Calceta	C2	6.6	50.3	7.1
112	Ec 7c	Falla Cañaverl (Secc Jama)	C2	6.6	46.7	7.0
113	Ec 7c	Falla Cañaverl (Secc Jama)	C2	6.6	22.7	6.7
50	Ec 6	Lineamiento Mache S1	C2	6.6	22.1	6.7
47	Ec 4	Falla Galera	C2	6.6	17.3	6.6
48	Ec 4	Falla Galera	C2	6.6	25.1	6.8
51	Ec 6	Lineamiento Mache S2	C2	6.6	45.0	7.0
100	Ec 18	Falla La Cruz	C2	6.6	47.8	7.0
101	Ec 19	Falla Chanduy	C2	6.6	34.4	6.9
106	Ec 16a	Falla Colonche (Secc Noroeste)	C2	6.6	10.3	6.4
102	Ec 17	Falla Carrisal	C2	6.6	66.0	7.2
49	Ec 5	Falla Buga	C2	6.6	24.6	6.8
52	Ec 7a	Falla Cañaverl (Sección norte)	C2	6.6	11.4	6.5
53	Ec 7a	Falla Cañaverl (Sección norte)	C2	6.6	22.3	6.7
54	Ec 7a	Falla Cañaverl (Sección norte)	C2	6.6	19.0	6.7
108	Ec 14b	Falla Jipijapa (Secc Julcuy)	C2	6.6	15.9	6.6
109	Ec 14a	Falla Jipijapa (Secc Jipijapa)	C2	6.6	23.6	6.8
111	Ec 10b	Falla Bahía (Secc Sur)	C2	6.6	22.2	6.7
114	Ec 7d	Falla Cañaverl (Secc San Isidro)	C2	6.6	15.1	6.6

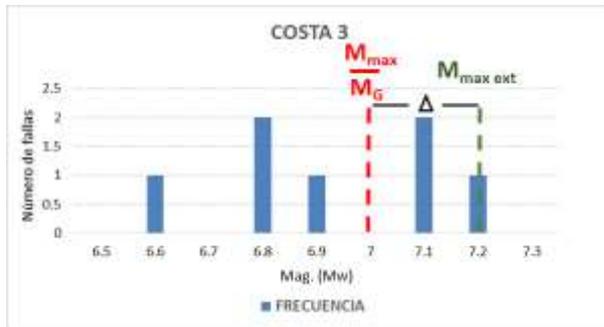
Mmed 6.8  
DELTA 0.4



### COSTA 3 (C3):

ID.	FALLA NÚMERO	NOMBRE ESTRUCTURA	ZONA	Mmax. Obs. ZONA (Mw)	LONGITUD (km)	STIRLING 2002
70	Ec 43b	Falla Valencia-La Maná (Secc La Maná)	C3	4.8	15.0	6.6
65	Ec 12	Falla Daule	C3	4.8	77.9	7.2
66	Ec 13	Falla Buena Fe	C3	4.8	61.1	7.1
72	Ec 45	Falla Calabí	C3	4.8	37.5	6.9
107	Ec 15	Falla Río Colimes	C3	4.8	27.2	6.8
56	Ec 8	Falla Quinindé	C3	4.8	57.8	7.1
57	Ec 8	Falla Quinindé	C3	4.8	28.2	6.8

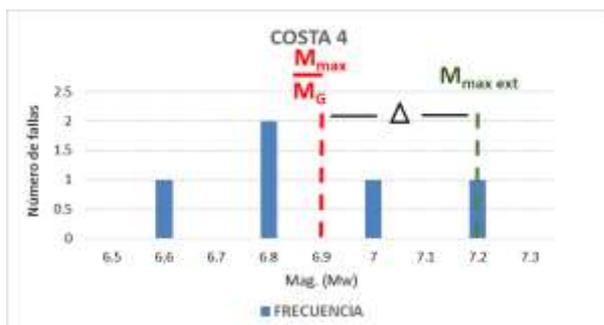
Mmed 7  
DELTA 0.2



### COSTA 4 (C4):

ID.	FALLA NÚMERO	NOMBRE ESTRUCTURA	ZONA	Mmax. Obs. ZONA (Mw)	LONGITUD (km)	STIRLING 2002
85	Ec 21	Falla Jambelí	C4	5.6	16.9	6.6
83	Ec 52	Falla Naranjal	C4	5.6	25.9	6.8
79	Ec 51	Falla Pancho Negro	C4	5.6	24.0	6.8
86	Ec 22	Falla Puná	C4	5.6	43.9	7.0
11	Ec 20	Falla Posorja	C4	5.6	73.5	7.2

Mmed 6.9  
DELTA 0.3

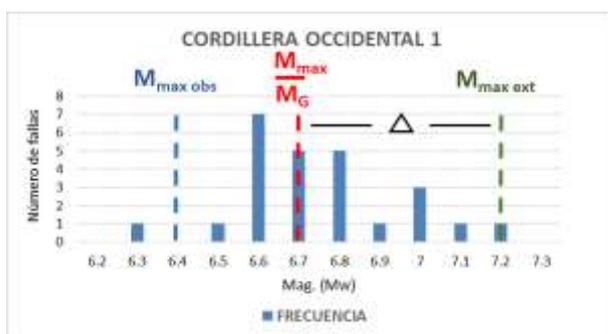


**CORDILLERA OCCIDENTAL 1 (CO1):**

ID.	FALLA NÚMERO	NOMBRE ESTRUCTURA	ZONA	Mmax. Obs. ZONA (Mw)	LONGITUD (km)	STIRLING 2002
62	Ec 34	Falla Río Baba	CO1	6.4	27.0	6.8
67	Ec 42	Falla Pucayacu	CO1	6.4	15.8	6.6
68	Ec 42	Falla Pucayacu	CO1	6.4	16.6	6.6
69	Ec 41b	Falla Chugchilán-Sigchos (Secc Chugchilán)	CO1	6.4	23.0	6.7
71	Ec 44	Falla Quinsaloma	CO1	6.4	24.3	6.8
73	Ec 48	Falla Montalvo	CO1	6.4	38.1	7.0
77	Ec 48	Falla Montalvo	CO1	6.4	20.6	6.7
119	Ec 27a	Falla Billecocha - Huayrapungo (S Billecocha)	CO1	6.4	7.0	6.3
63	Ec 32	Falla Tandapi	CO1	6.4	15.9	6.6
75	Ec 46a	Falla Río Salinas (Secc Salinas)	CO1	6.4	15.7	6.6
115	Ec 28a	Falla Apuela (Sección Norte)	CO1	6.4	25.4	6.8
116	Ec 28c	Falla Apuela (Sección Sur)	CO1	6.4	28.4	6.8
124	CO-43	C_01 (Chunga 2010)	CO1	6.4	72.0	7.2
131	Ec 40	Falla Guangaje	CO1	6.4	17.1	6.6
58	Ec 3a,b,c	Falla Río Canandé (Secc Oeste)	CO1	6.4	59.6	7.1
132	Ec 40	Falla Guangaje	CO1	6.4	16.2	6.6
0	Ec 28b	Falla Apuela (Secc central)	CO1	6.4	20.4	6.7
117	Ec 29	Falla Zona Nanegalito	CO1	6.4	43.6	7.0
118	Ec 27b	Falla Billecocha-Huayrapungo (S Huayrapungo)	CO1	6.4	14.9	6.6
125	Ec 30a	Falla El Cinto (Secc Guayacán)	CO1	6.4	12.2	6.5
61	Ec 43a	Falla Valencia-La Maná (Secc Valencia)	CO1	6.4	40.3	7.0
74	Ec 46b	Falla Río Salinas (Secc Sur)	CO1	6.4	19.8	6.7
76	Ec 47	Falla Guaranda	CO1	6.4	21.9	6.7
130	Ec 41a	Falla Chugchilán-Sigchos (Secc Sigchos)	CO1	6.4	29.2	6.8
78	Ec 49	Falla Chillanes	CO1	6.4	36.4	6.9

Mmed 6.7

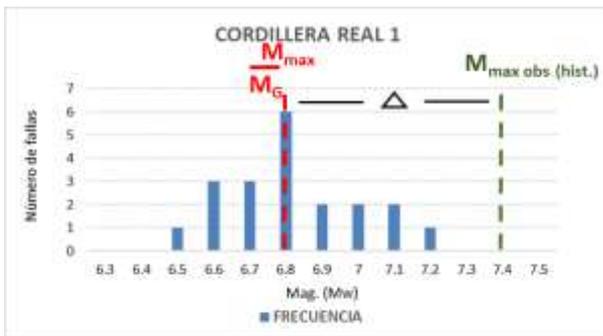
DELTA 0.5



**CORDILLERA REAL 1 (CR1):**

ID.	FALLA NÚMERO	NOMBRE ESTRUCTURA	ZONA	Mmax. Obs. ZONA (Mw)	LONGITUD (km)	STIRLING 2002
163	Ec 56	Falla Salado	CR1	7.4	19.8	6.7
169	Ec 55a	Falla Reventador (Secc Norte)	CR1	7.4	25.0	6.8
81	Ec 63	Falla Guamote	CR1	7.4	29.1	6.8
82	Ec 63	Falla Guamote	CR1	7.4	22.4	6.7
142	Ec 74	Falla Pastaza	CR1	7.4	17.8	6.6
144	Ec 62	Falla Candelaria	CR1	7.4	14.4	6.6
145	Ec 62	Falla Candelaria	CR1	7.4	12.3	6.5
171	Ec 54	Falla Chingual	CR1	7.4	46.0	7.0
172	Ec 54	Falla Chingual	CR1	7.4	32.0	6.9
140	Ec 61	Falla Patate	CR1	7.4	14.4	6.6
170	Ec 55b	Falla Reventador (Secc Sur)	CR1	7.4	26.4	6.8
138	Ec 60	Falla Pisayambo	CR1	7.4	23.5	6.8
174	CO-291	Falla CO_291	CR1	7.4	57.5	7.1
137	Ec 59	Falla Huacamayos	CR1	7.4	39.6	7.0
161	Ec 57	Falla Baeza-Chaco	CR1	7.4	54.4	7.1
162	Ec 58	Falla Cosanga	CR1	7.4	29.7	6.8
164	Ec 56	Falla Salado	CR1	7.4	26.8	6.8
165	Ec 56	Falla Salado	CR1	7.4	36.1	6.9
168	Ec 56	Falla Salado	CR1	7.4	21.1	6.7
173	CO-29m	Falla CO_29	CR1	7.4	78.0	7.2

Mmed 6.8  
DELTA 0.6

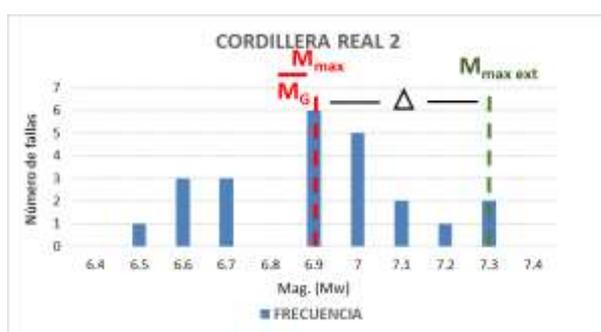


## CORDILLERA REAL 2 (CR2):

ID.	FALLA NÚMERO	NOMBRE ESTRUCTURA	ZONA	Mmax. Obs. ZONA (Mw)	LONGITUD (km)	STIRLING 2002
16	P-34	P34 Chunga 2010	CR2	5.1	31.7	6.9
84	Ec 53	Falla Ponce Enriquez	CR2	5.1	56.9	7.1
88	Ec 79	Falla Gualaceo	CR2	5.1	32.6	6.9
91	Ec 85	Falla Las Pitás	CR2	5.1	11.5	6.5
92	Ec 86	Falla El Tambo	CR2	5.1	17.9	6.6
93	Ec 87	Falla Loja	CR2	5.1	34.7	6.9
96	Ec 89	Falla Las Aradas	CR2	5.1	47.5	7.0
12	P-35	P35 Chunga 2010	CR2	5.1	34.5	6.9
13	SI	P36 Chunga 2010	CR2	5.1	33.3	6.9
15	P-33	P33 Chunga 2010	CR2	5.1	46.9	7.0
17	P-31	P31 Chunga 2010	CR2	5.1	85.7	7.3
87	Ec 81a	Falla Girón (Secc Noreste)	CR2	5.1	44.7	7.0
14	P-37	P37 Chunga 2010	CR2	5.1	55.8	7.1
19	SI		CR2	5.1	17.7	6.6
99	Ec 82a	Falla Celica-Macará (Secc Celica)	CR2	5.1	73.3	7.2
148	Ec 78	Falla Paute	CR2	5.1	46.5	7.0
18	SI		CR2	5.1	20.5	6.7
89	Ec 83	Falla La Toma	CR2	5.1	21.4	6.7
90	Ec 84	Falla Catamayo	CR2	5.1	18.2	6.6
94	Ec 90a	Falla Numbala (Secc Norte)	CR2	5.1	97.1	7.3
95	Ec 90b	Falla Numbala (Secc Sur)	CR2	5.1	42.9	7.0
97	Ec 88	Falla Solanda	CR2	5.1	21.0	6.7
98	Ec 82b	Falla Celica-Macará (Secc Macará)	CR2	5.1	35.3	6.9

Mmed 6.9

DELTA 0.4

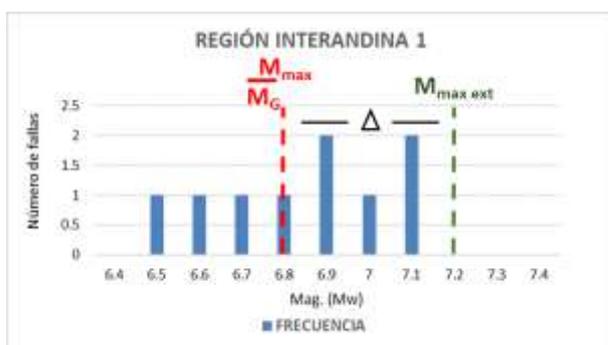


### REGIÓN INTERANDINA 1 (RI1):

ID.	FALLA NÚMERO	NOMBRE ESTRUCTURA	ZONA	Mmax. Obs. ZONA (Mw)	LONGITUD (km)	STIRLING 2002
120	Ec 26	Falla Otavalo	RI1	7.3	21.3	6.7
123	Ec 23	Falla San Isidro	RI1	7.3	11.7	6.5
175	CO-44	C03 CHUNGA	RI1	7.3	36.8	6.9
5	CO-15	C12 CHUNGA	RI1	7.3	32.2	6.9
7	CO-15	C10 CHUNGA	RI1	7.3	61.5	7.1
8	CO-15	C09 CHUNGA	RI1	7.3	61	7.1
6	CO-15	C11 CHUNGA	RI1	7.3	42.2	7.0
121	Ec 25	Falla Río Ambi	RI1	7.3	15.6	6.6
122	Ec 24	Falla El Angel	RI1	7.3	26.3	6.8

Mmed 6.9

DELTA 0.4

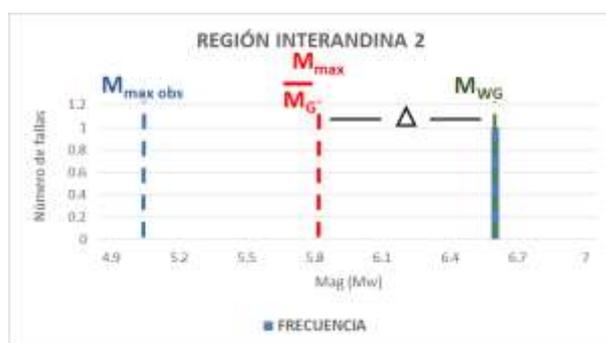


### REGIÓN INTERANDINA 2 (RI2):

ID.	FALLA NÚMERO	NOMBRE ESTRUCTURA	ZONA	Mmax. Obs. ZONA (Mw)	LONGITUD (km)	STIRLING 2002
129	Ec 33	Falla Papallacta	RI2	5.0	16.1	6.6

Mmed 5.8

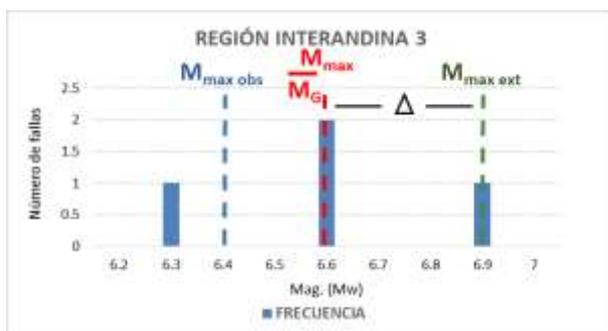
DELTA 0.8



### REGIÓN INTERANDINA 3 (RI3):

ID.	FALLA NÚMERO	NOMBRE ESTRUCTURA	ZONA	Mmax. Obs. ZONA (Mw)	LONGITUD (km)	STIRLING 2002
64	Ec 35	Falla Machachi	RI3	6.4	32.8	6.9
126	Ec 30b	Falla El Cinto (Secc Río Cinto)	RI3	6.4	8.0	6.3
127	Ec 31b	Falla Quito (Sección Sur)	RI3	6.4	15.0	6.6
128	Ec 31a	Falla Quito (Sección Norte)	RI3	6.4	17.5	6.6

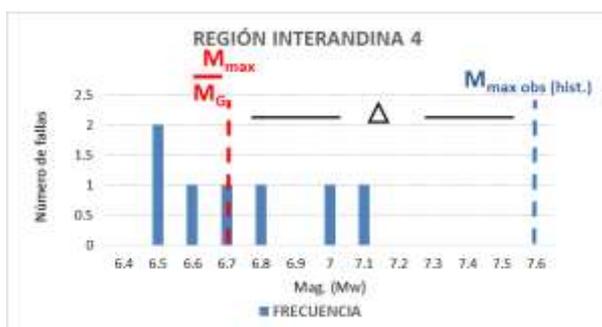
Mmed	6.6
DELTA	0.3



### REGIÓN INTERANDINA 4 (RI4):

ID.	FALLA NÚMERO	NOMBRE ESTRUCTURA	ZONA	Mmax. Obs. ZONA (Mw)	LONGITUD (km)	STIRLING 2002
133	Ec 36	Falla Poaló	RI4	7.6	20.3	6.7
147	Ec 50b	Falla Zona Pallatanga (Secc Central)	RI4	7.6	17.0	6.6
134	Ec 37	Anticlinal Nagsiche	RI4	7.6	28.3	6.8
80	Ec 50c	Falla Zona Pallatanga (Secc Sur)	RI4	7.6	12.2	6.5
135	Ec 38	Anticlinal Latacunga	RI4	7.6	13.9	6.5
136	Ec 39	Anticlinal Yanayacu	RI4	7.6	50.1	7.1
146	Ec 50a	Falla Zona Pallatanga (Secc Pallatanga)	RI4	7.6	38.6	7.0

Mmed	6.7
DELTA	0.9

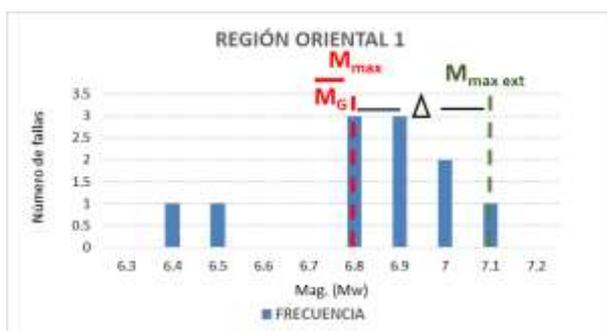


### REGIÓN ORIENTAL 1 (RO1):

ID.	FALLA NÚMERO	NOMBRE ESTRUCTURA	ZONA	Mmax. Obs. ZONA (Mw)	LONGITUD (km)	STIRLING 2002
156	Ec 69	Falla Pusuno	RO1	5.4	29.3	6.8
158	Ec 67	Falla Hollín	RO1	5.4	32.0	6.9
159	Ec 66	Falla Sumaco	RO1	5.4	38.8	7.0
160	Ec 65	Falla Payamino	RO1	5.4	48.3	7.0
166	Ec 64	Falla Cascales	RO1	5.4	23.9	6.8
167	Ec 64	Falla Cascales	RO1	5.4	50.2	7.1
141	Ec 72	Falla Mera	RO1	5.4	12.3	6.5
143	Ec 73	Falla Puyo	RO1	5.4	10.8	6.4
155	Ec 70	Falla Arajuno	RO1	5.4	28.1	6.8
139	Ec 71	Falla Anzu	RO1	5.4	31.7	6.9
157	Ec 68	Falla Tena	RO1	5.4	34.8	6.9

Mmed 6.8

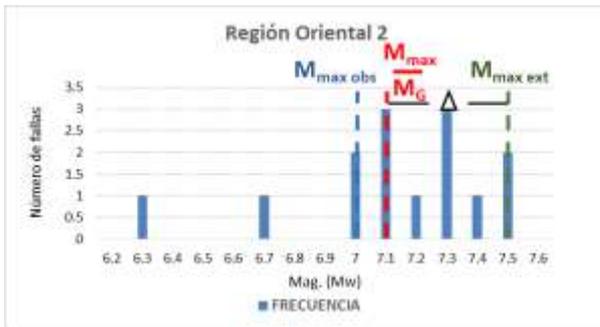
DELTA 0.3



### REGIÓN ORIENTAL 2 (RO2):

ID.	FALLA NÚMERO	NOMBRE ESTRUCTURA	ZONA	Mmax. Obs. ZONA (Mw)	LONGITUD (km)	STIRLING 2002
26	SI	Falla P_06 CHUNGA	RO2	7.0	7.9	6.3
27	SI	P_07 CHUNGA	RO2	7.0	23.2	6.7
28	SI	P_08 CHUNGA	RO2	7.0	46.1	7.0
29	P-09	P_09 CHUNGA	RO2	7.0	71.6	7.2
30	P-10	P_10 CHUNGA	RO2	7.0	53.5	7.1
149	SI	P_04 CHUNGA	RO2	7.0	98.5	7.3
151	SI	P_03 CHUNGA	RO2	7.0	51.8	7.1
24	P-05	Falla P_05 CHUNGA	RO2	7.0	98.5	7.3
25	Ec 91	Falla Nangaritzza Parte Norte	RO2	7.0	38.4	7.0
152	Ec 75	Falla Santiago-Upano	RO2	7.0	80.5	7.3
154	Ec 77	Falla Taisha	RO2	7.0	53.9	7.1
23	P-28	P_28 CHUNGA	RO2	7.0	148.2	7.5
150	FI	P_01 CHUNGA	RO2	7.0	154.4	7.5
153	Ec 76	Falla Macuma	RO2	7.0	119.0	7.4

Mmed	7.1
DELTA	0.4

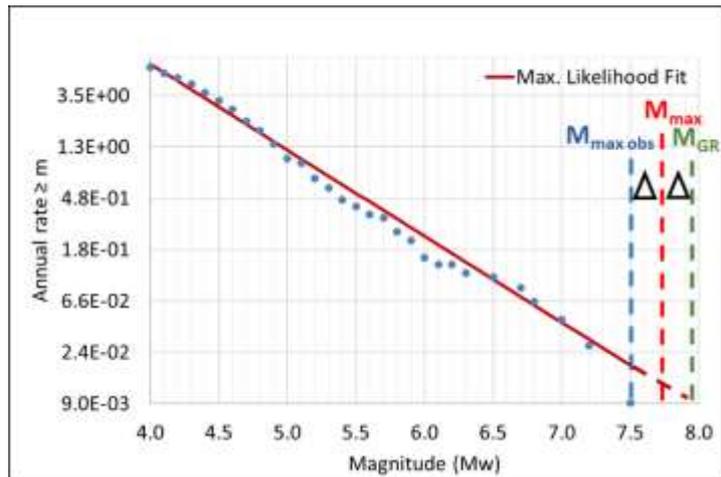


**b) EN ZONAS DE SUBDUCCIÓN POR ANÁLISIS DE LA TENDENCIA DE SISMICIDAD.**

**ZONIFICACIÓN IN-SLAB:**

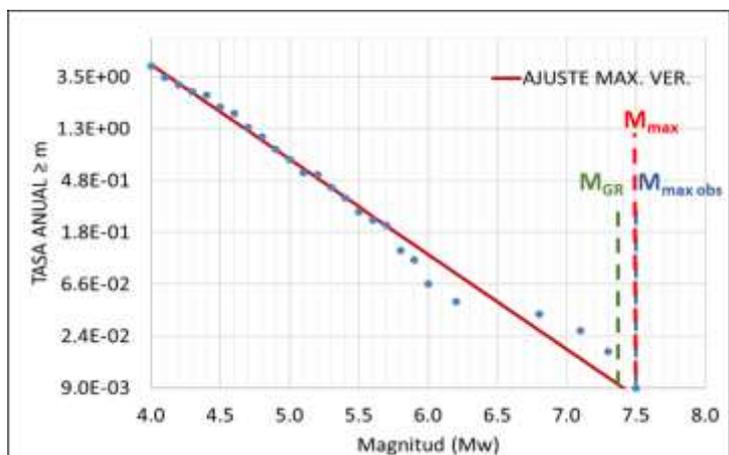
**IN-SLAB SUR (ISS):**

M <sub>GR</sub>	7.9
M <sub>max</sub>	7.7
Delt	0.2



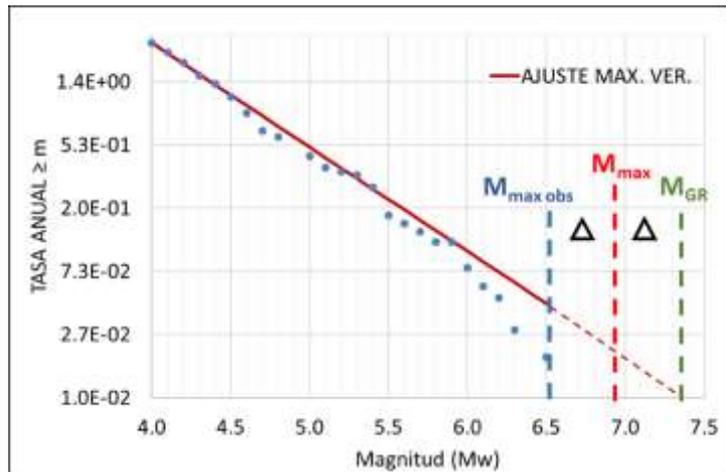
**IN-SLAB SUR CENTRO (ISSC):**

M <sub>GR</sub>	7.4
M <sub>max</sub>	7.5
Delt	0.1



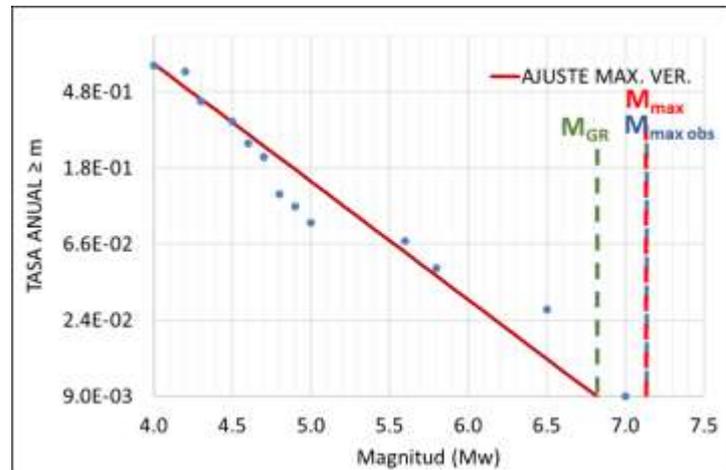
**IN-SLAB NORTE CENTRO (ISNC):**

M <sub>GR</sub>	7.5
M <sub>max</sub>	7.0
Delt	0.5



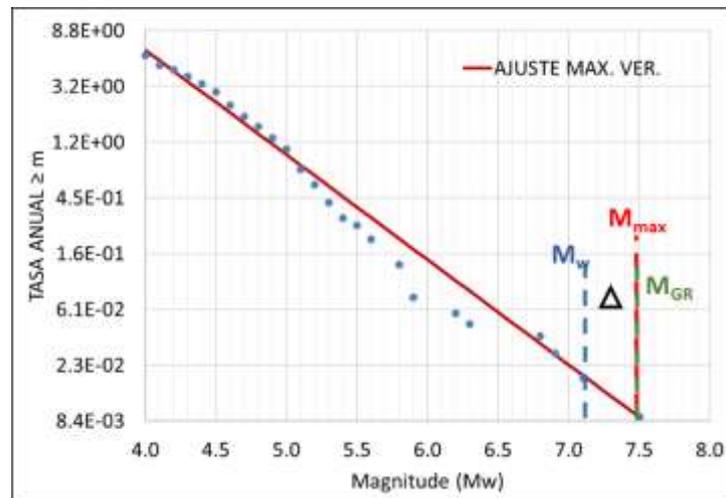
**IN-SLAB NORTE (ISN):**

M <sub>GR</sub>	6.8
M <sub>max</sub>	7.2
Delt	0.4



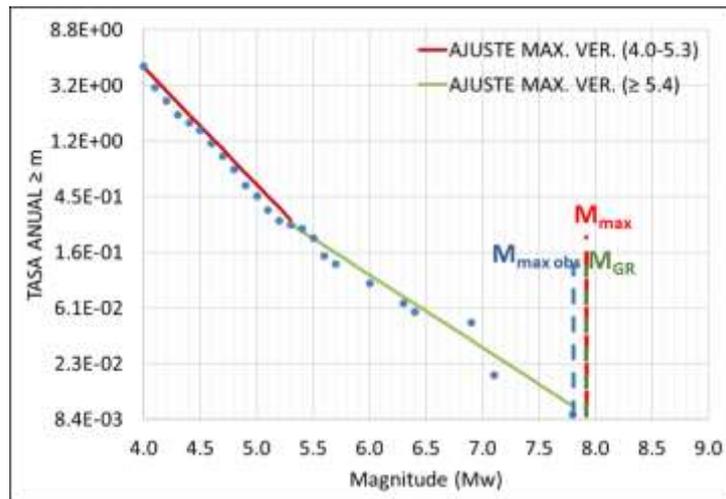
**INTERFASE SUR (IFS):**

M <sub>w</sub>	7.1
M <sub>max</sub>	7.5
Delt	0.4



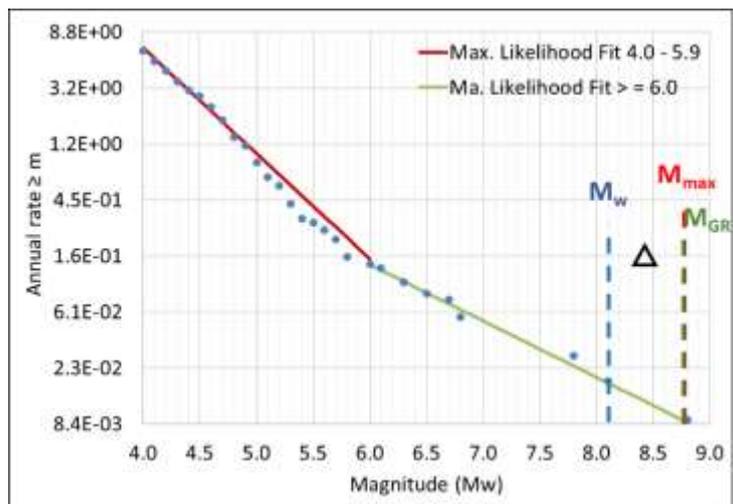
**INTERFASE CENTRO (IFC):**

M <sub>GR</sub>	7.9
M <sub>max</sub>	7.9
Delt	0.1



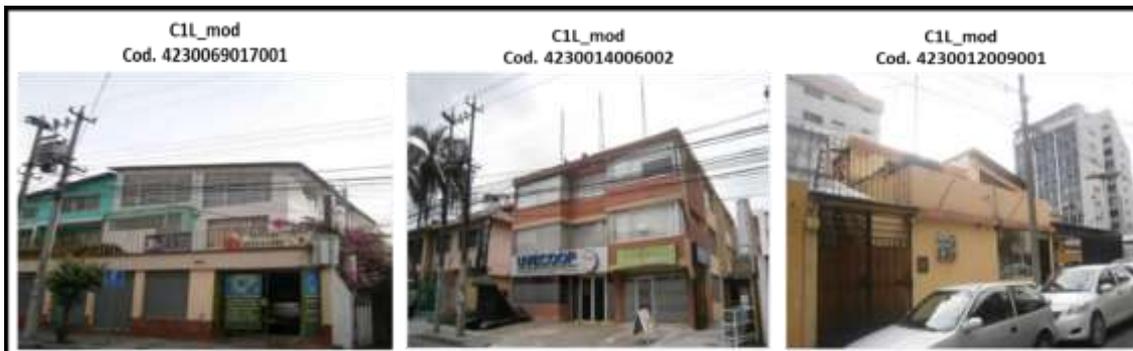
**INTERFASE NORTE (IFN):**

M <sub>w</sub>	8.1
M <sub>max</sub>	8.8
Delt	0.7



### ANEXO 3

(CAPÍTULO 5: ARCHIVO FOTOGRÁFICO DE LAS TIPOLOGÍAS IDENTIFICADAS EN LA ZONA DE ESTUDIO, CON SU CORRESPONDIENTE ASIGNACIÓN DE VULNERABILIDAD).



C1L\_low  
Cod. 4230004023001



C1L\_low  
Cod. 4230015011001



C1L\_low  
Cod. 4230017009001



C1L\_low  
Cod. 4230033011003



C1L\_low  
Cod. 4230046010002



C1L\_low  
Cod. 4230070007002



C1L\_low  
Cod. 4230076013001



C1L\_low  
Cod. 4230102006001



C1L\_low  
Cod. 4230108004001



C1L\_low  
Cod. 4230027010001



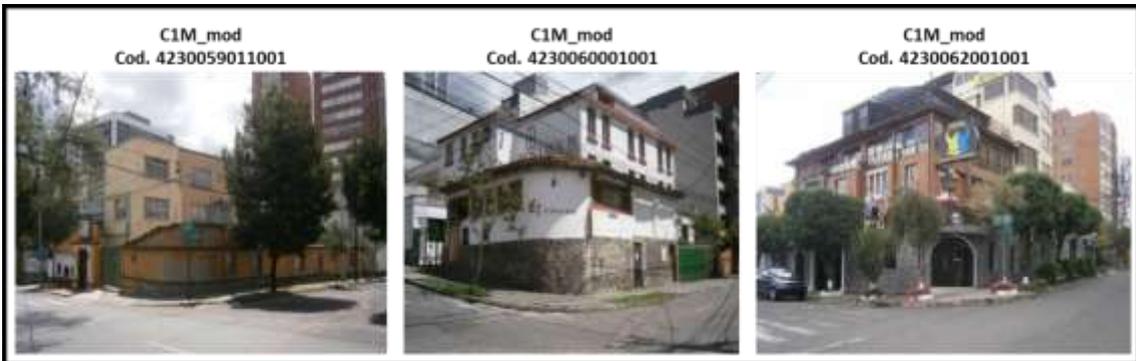
C1L\_low  
Cod. 4230004020001



C1L\_low  
Cod. 4230046010002







C1M\_low  
Cod. 4230033025001



C1M\_low  
Cod. 4230042009001



C1M\_low  
Cod. 4230046007001



C1M\_low  
Cod. 4230046004001



C1M\_low  
Cod. 4230143024001



C1M\_low  
Cod. 4230144008001



C1M\_low  
Cod. 4230150001001



C1M\_low  
Cod. 4230182017001



C1M\_low  
Cod. 4230189006002



C1M\_low  
Cod. 4230039006001



C1M\_low  
Cod. 4230147005001









S3\_low  
Cod. 4230148005001



S3\_low  
Cod. 04230033004001



S3\_low  
Cod. 04230071008007



S3\_low  
Cod. 04230149008002



S3\_low  
Cod. 04230003022001



S4H\_high  
Cod. 4230077016001



URML\_low  
Cod. 4230020014001



URML\_low  
Cod. 4230026005001



URML\_low  
Cod. 4230106002002



URML\_low  
Cod. 4230209015002



URML\_low  
Cod. 4230215011002



URML\_low  
Cod. 04230074002001



URML\_low  
Cod. 04230076014001



URML\_low  
Cod. 04230076015001



URML\_low  
Cod. 04230076016001



URML\_low  
Cod. 04230076003001



URML\_low  
Cod. 04230077009001



URML\_pre  
Cod. 4230009002002



URML\_pre  
Cod. 4230033017001



URML\_pre  
Cod. 4230146011002





URMM\_pre  
Cod. 4230064008001



URMM\_pre  
Cod. 4230076001001



URMM\_pre  
Cod. 04230189008001



URMM\_pre  
Cod. 04230185013001



URMM\_pre  
Cod. 04230186008001



URMM\_pre  
Cod. 04230188018001



URMM\_pre  
Cod. 04230193002001



URMM\_pre  
Cod. 4230078001001



W1\_low  
Cod. 4230078006001



W1\_pre  
Cod. 04230155012003



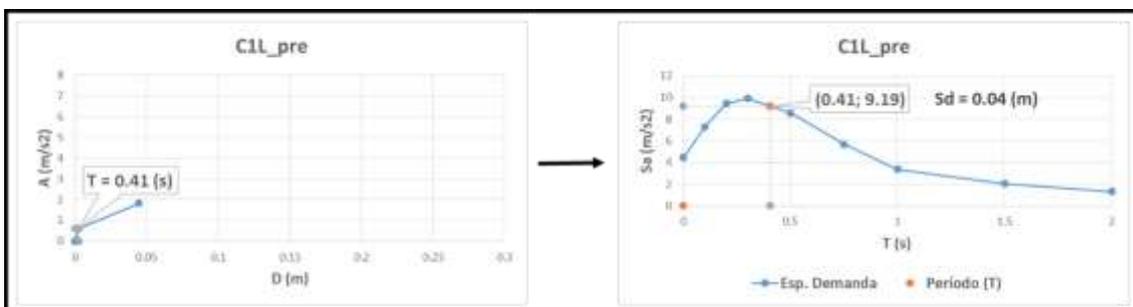
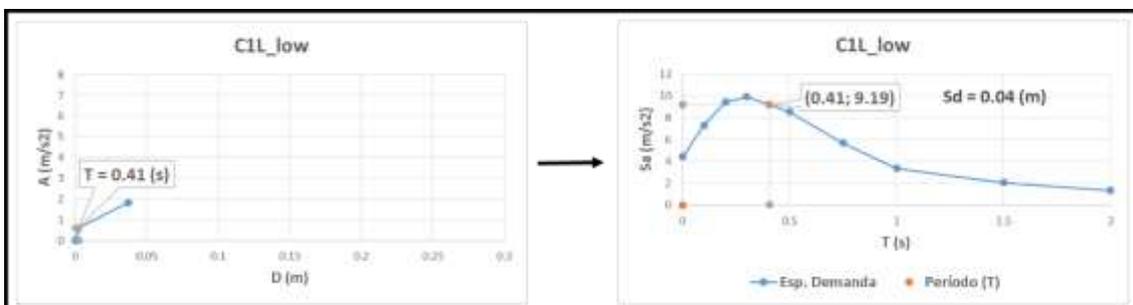
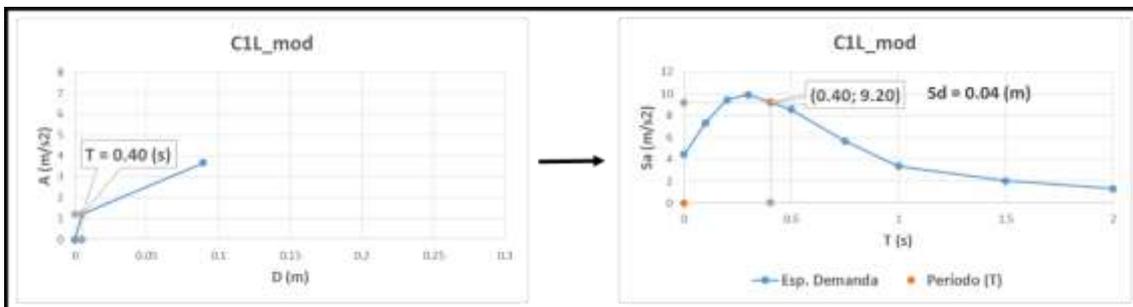
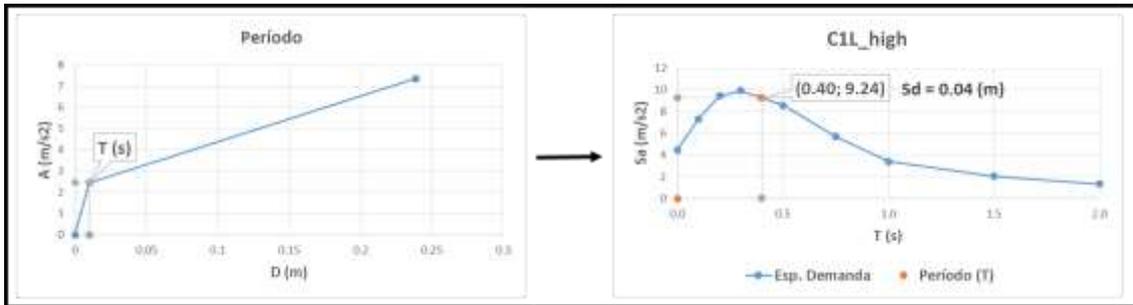
W2\_pre  
Cod. 4230078010001

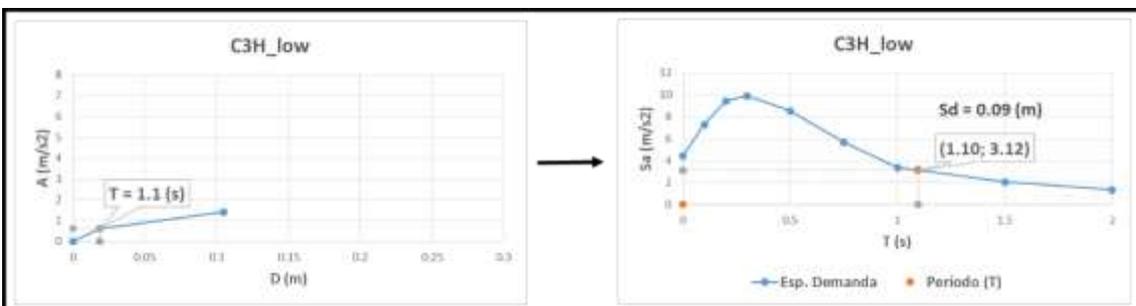
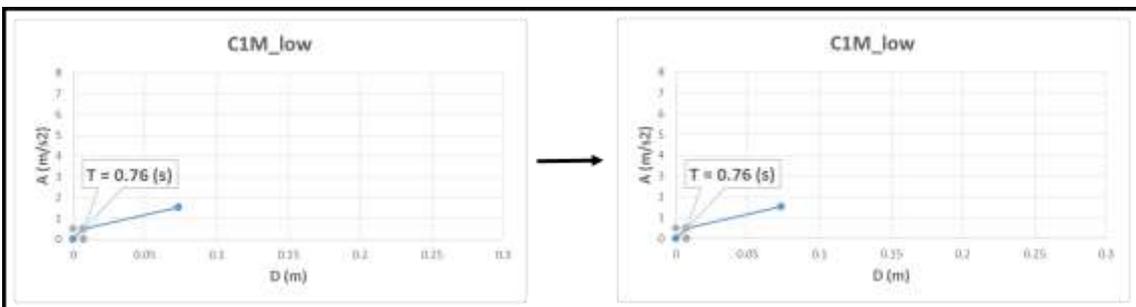
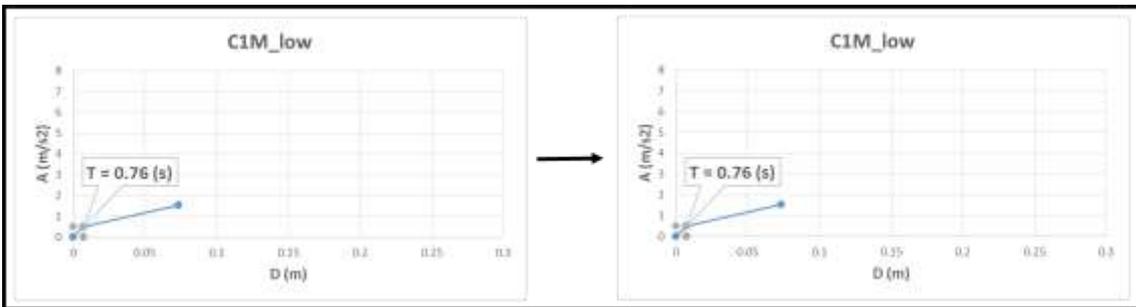
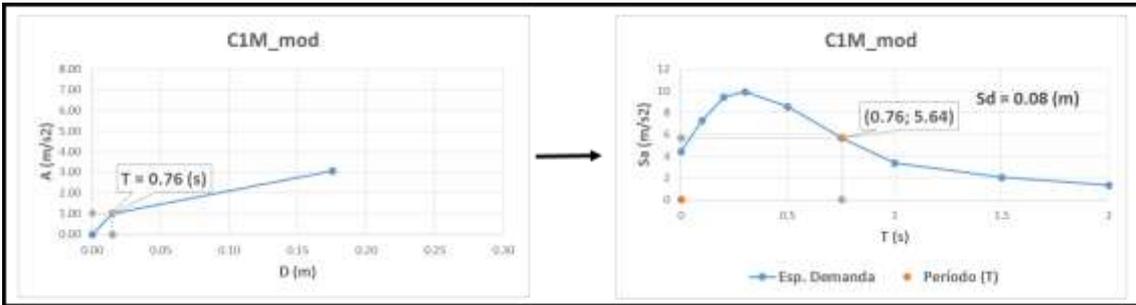
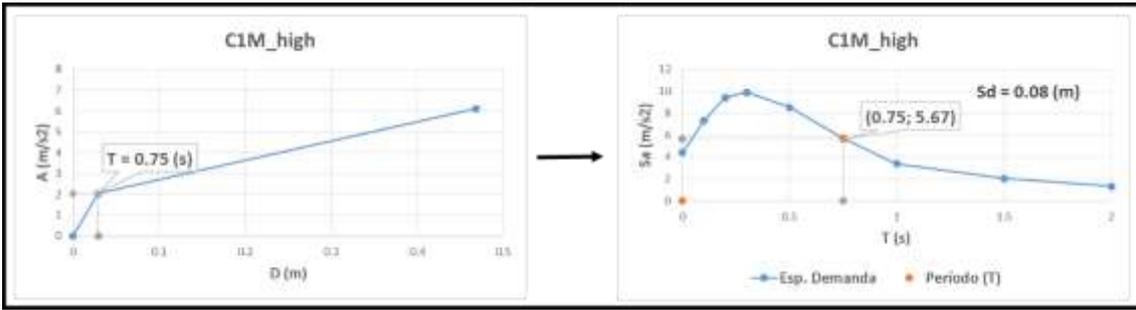


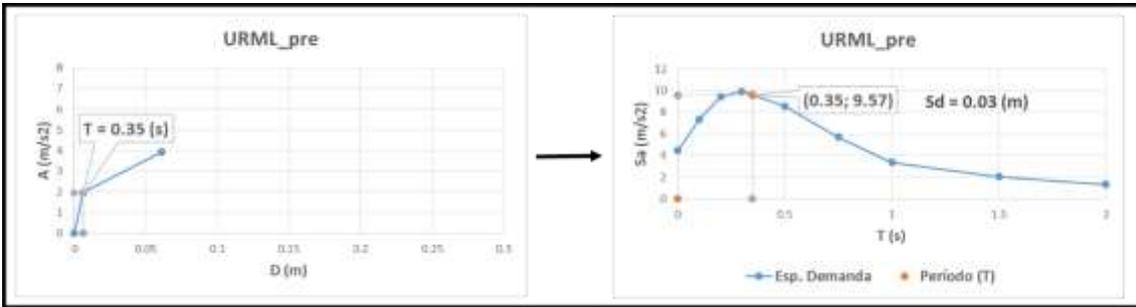
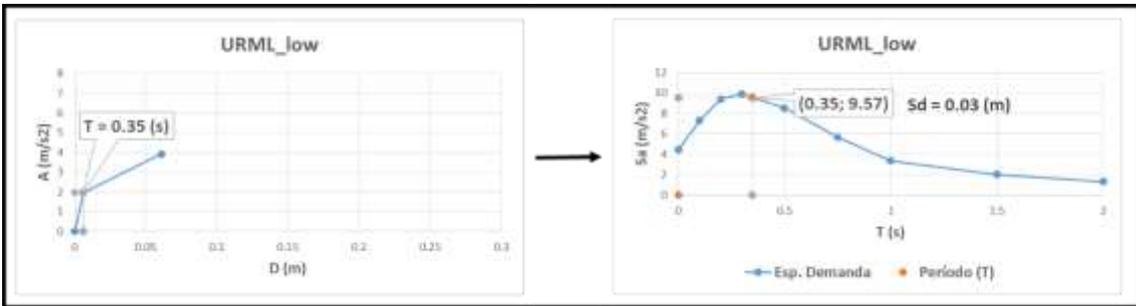
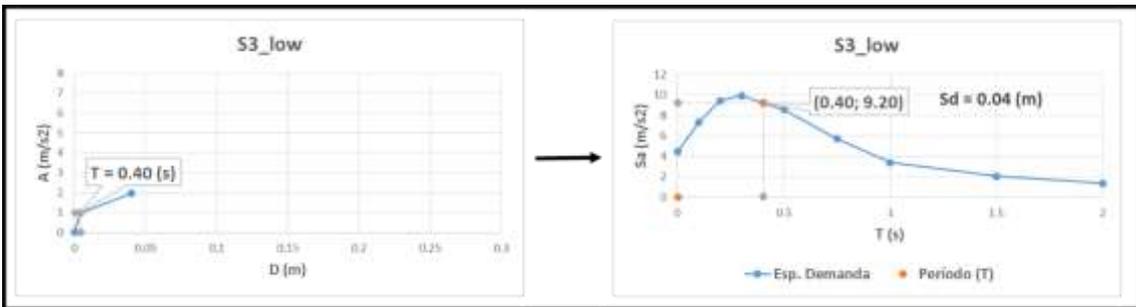
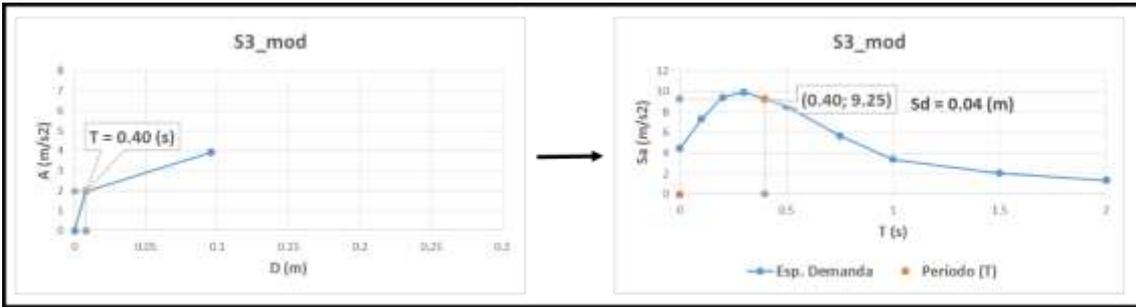
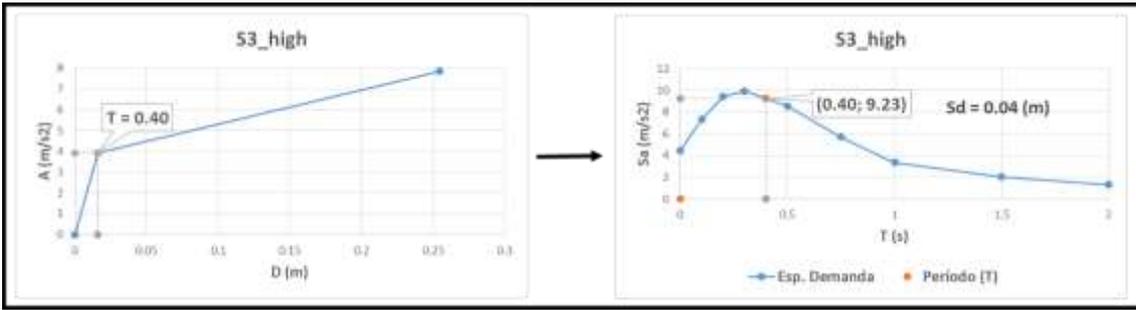
## ANEXO 4

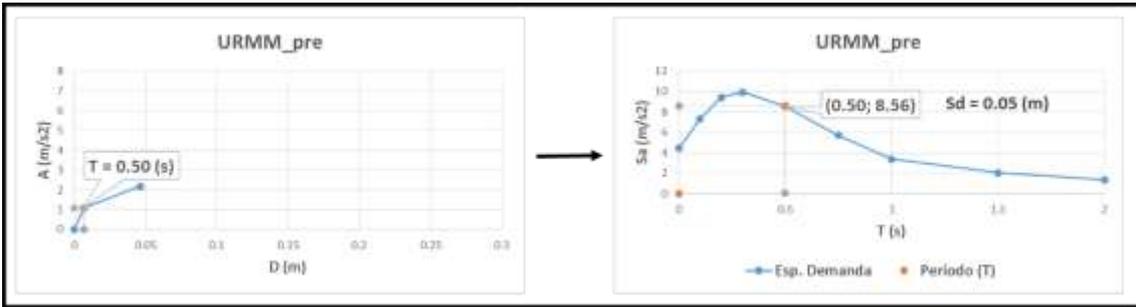
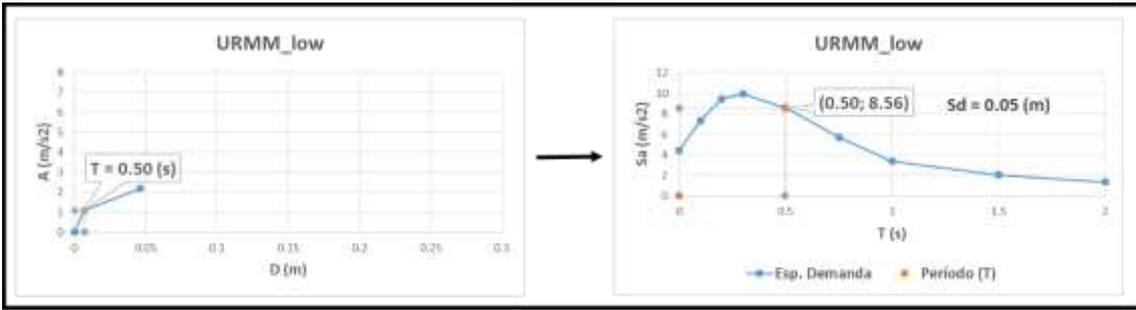
### (CAPÍTULO 5: CURVAS DE DEMANDA Y CAPACIDAD PARA CADA BARRIO Y CLASE DE VULNERABILIDAD: ESTIMACIÓN DE LA ACELERACIÓN ESPECTRAL MÁXIMA Y DESPLAZAMIENTO ESPECTRAL PICO).

**BARRIO LA COLÓN:**

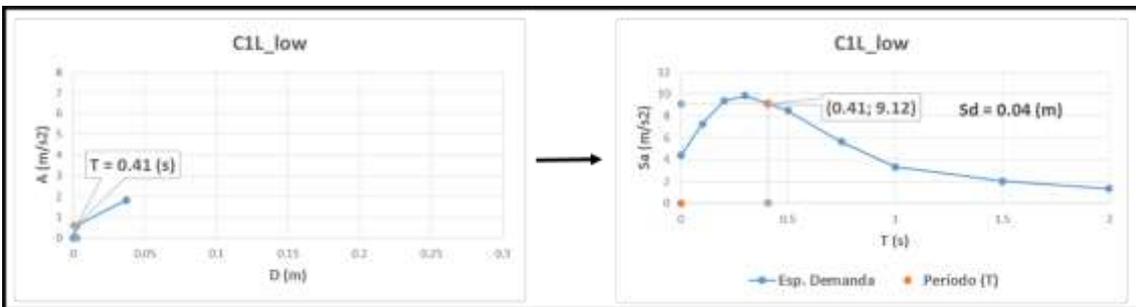
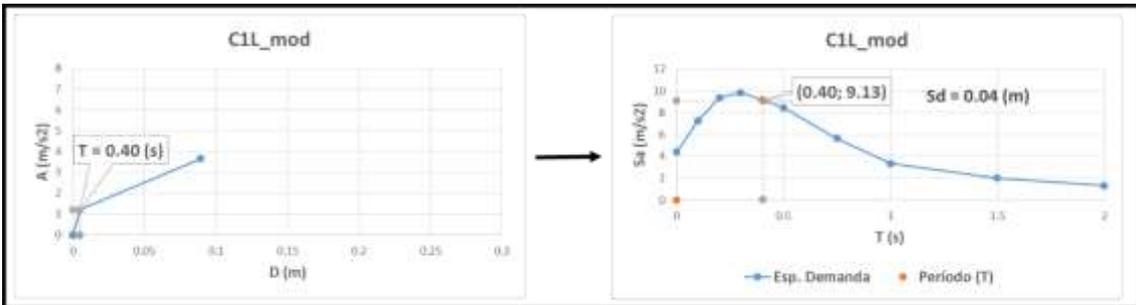
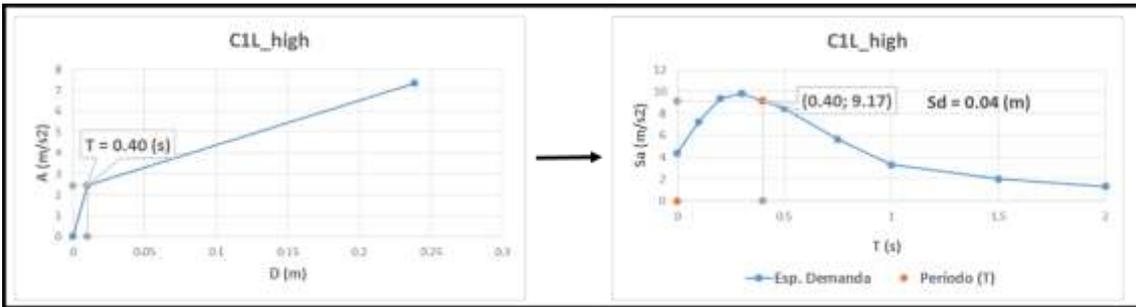


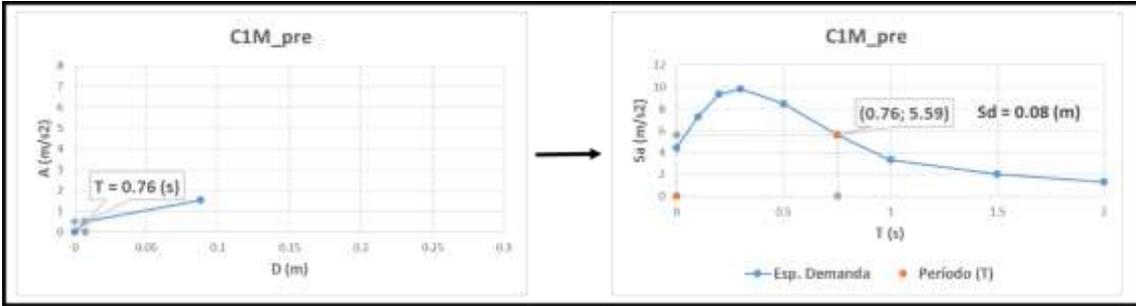
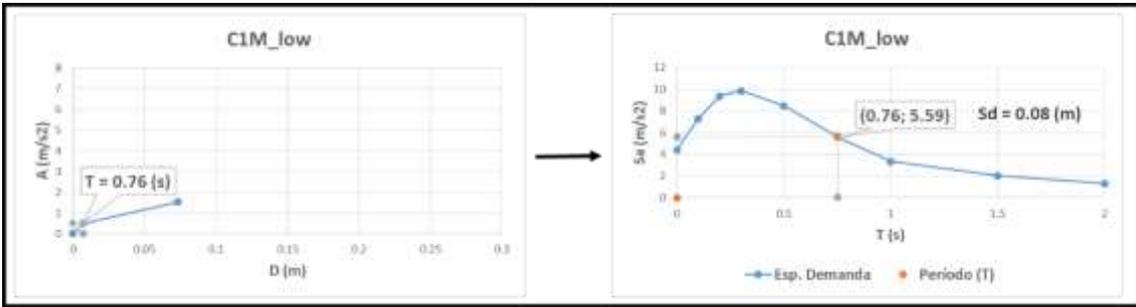
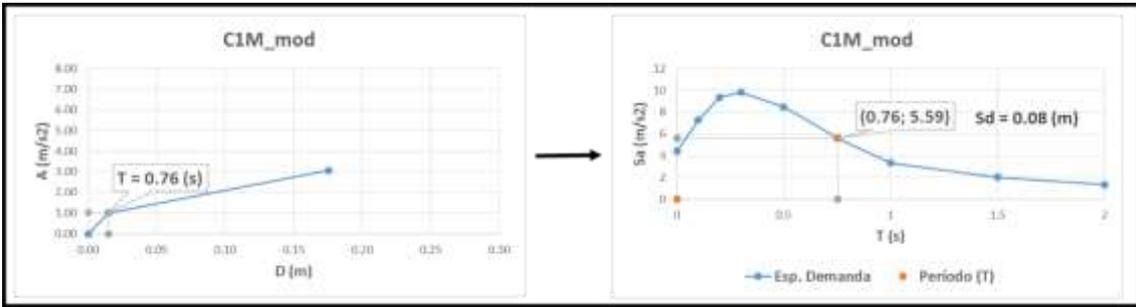
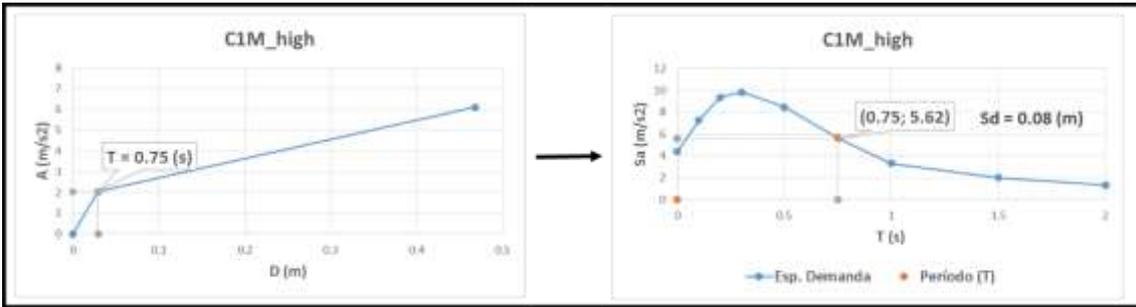
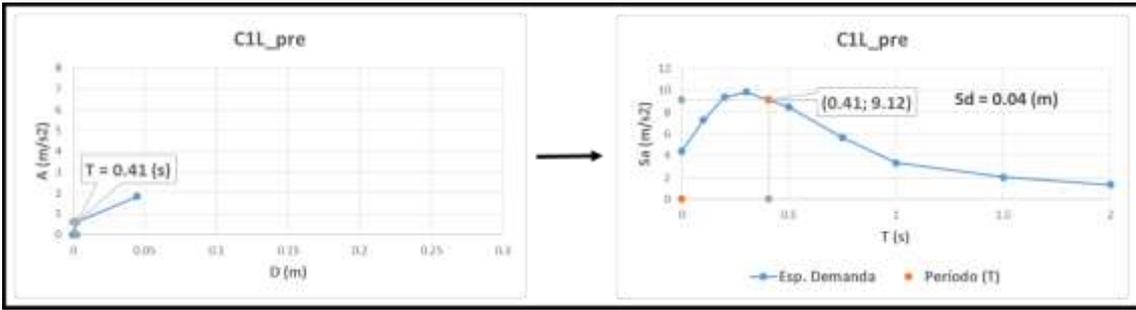


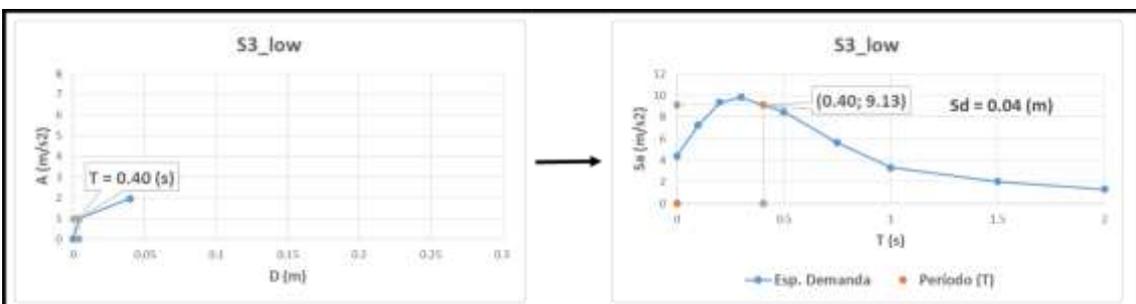
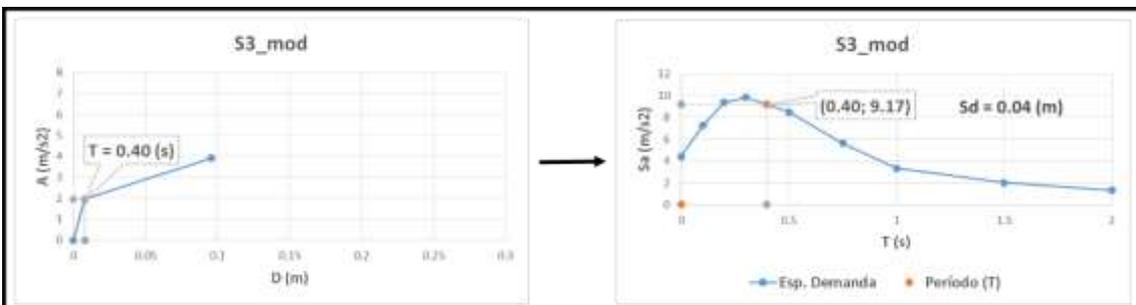
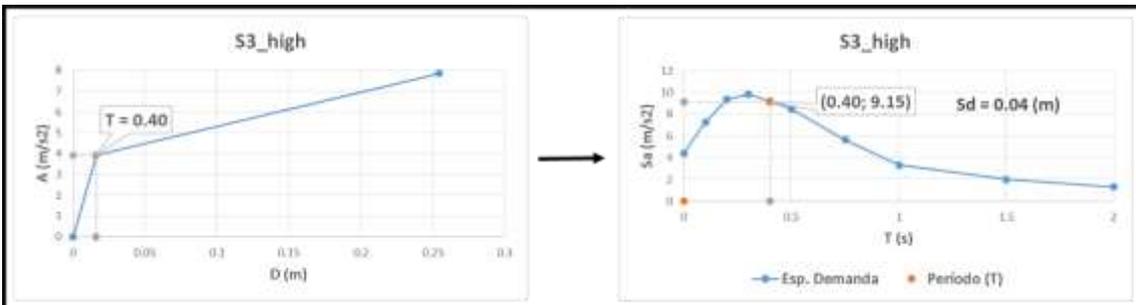
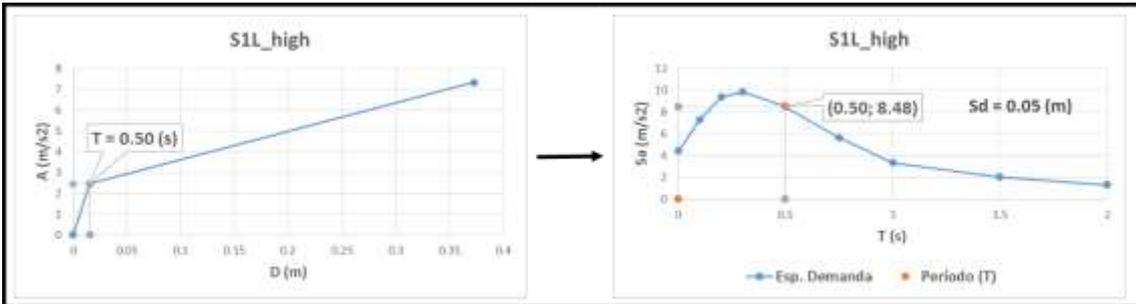
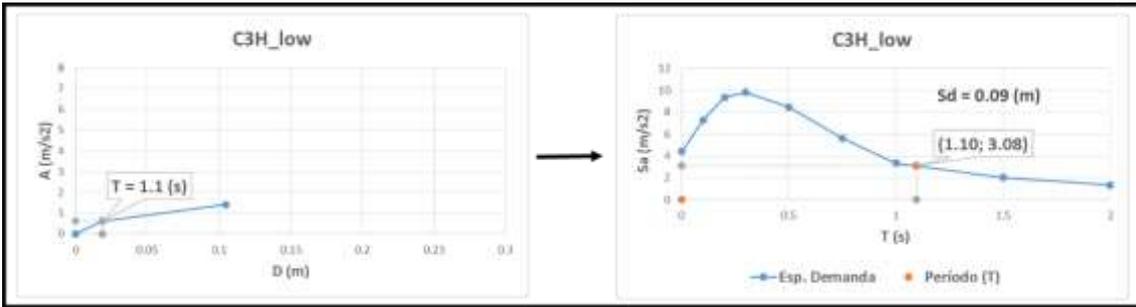


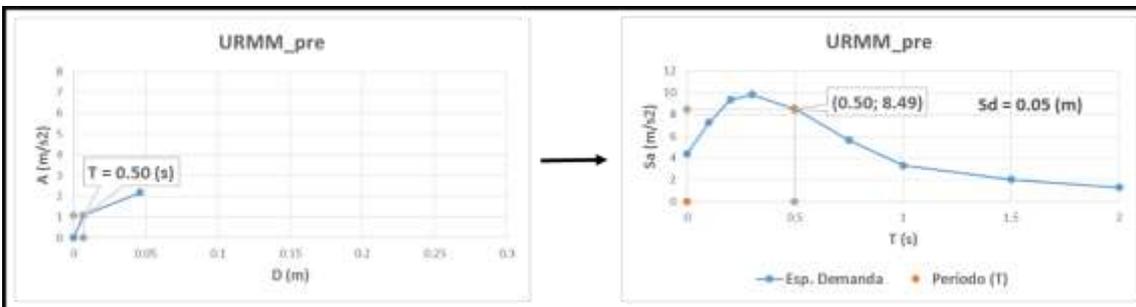
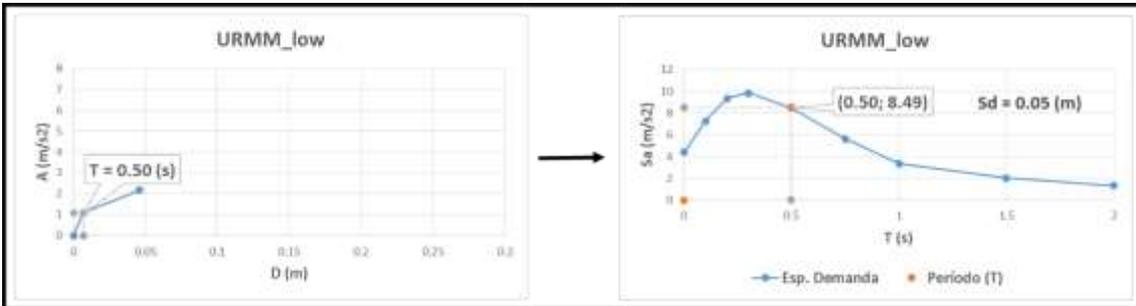
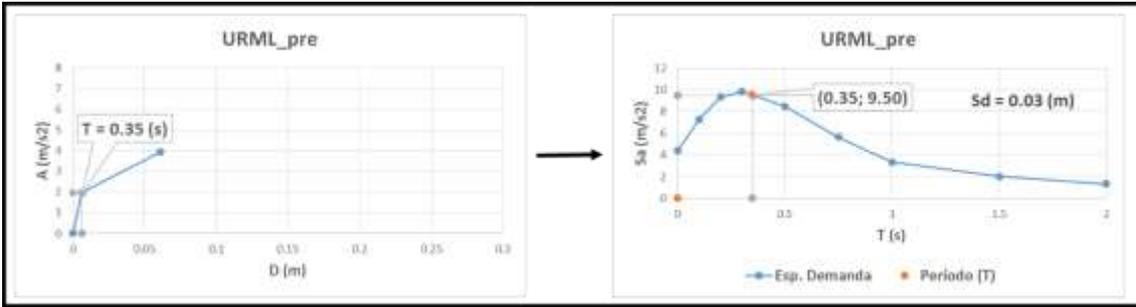
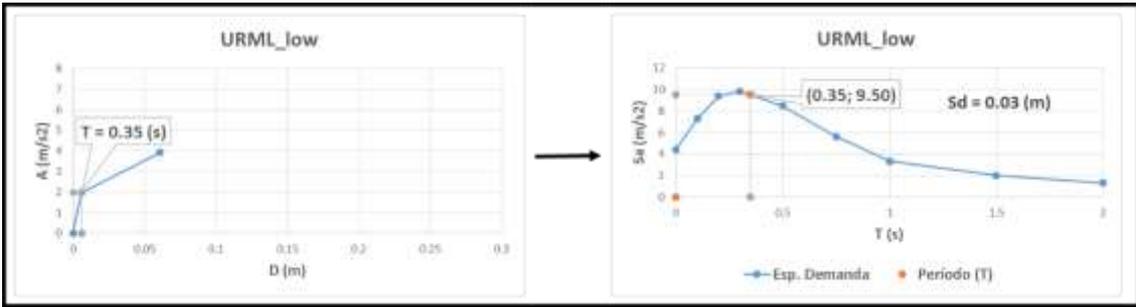
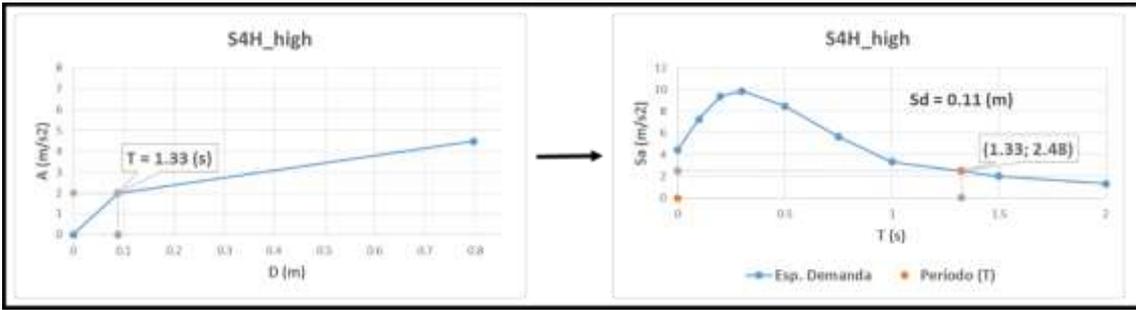


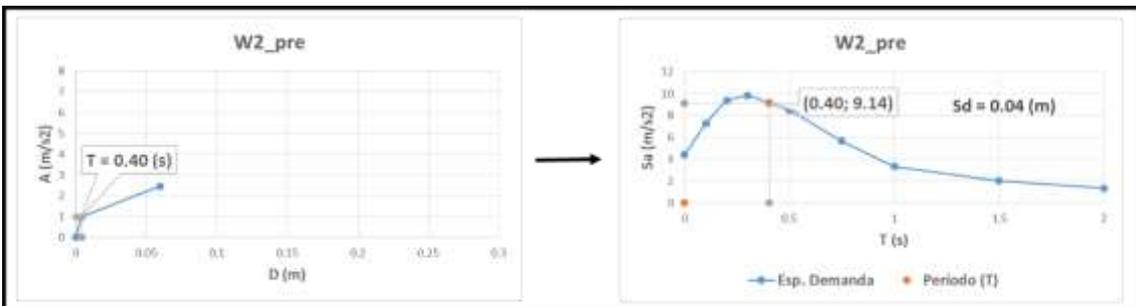
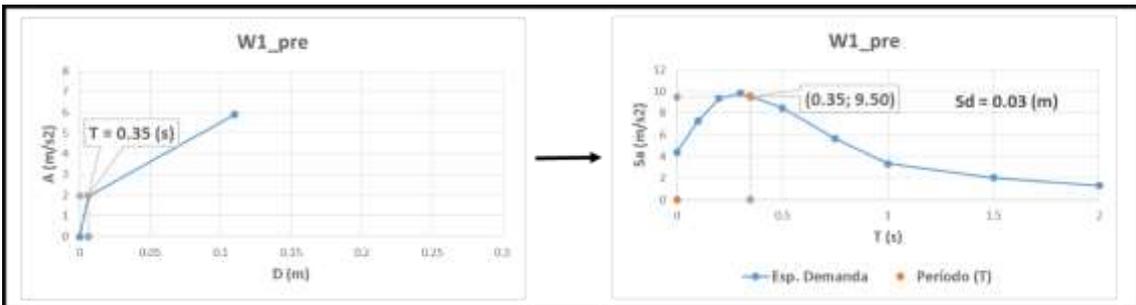
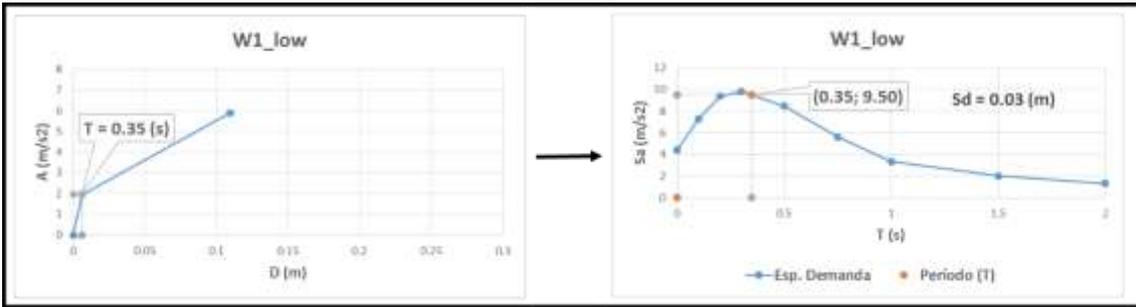
**BARRIO MARISCAL SUCRE:**



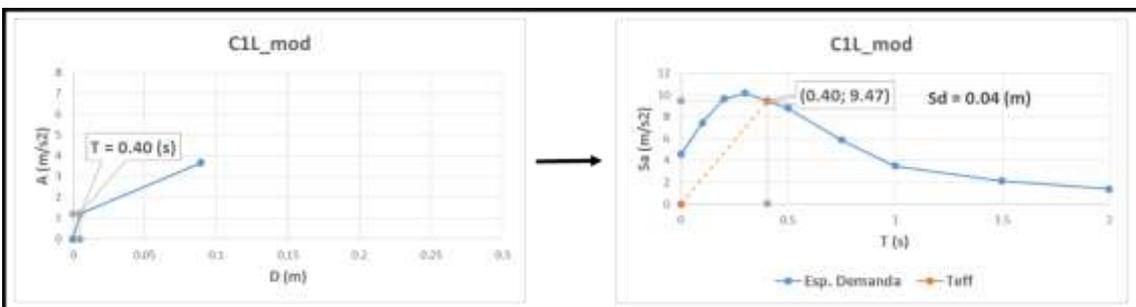
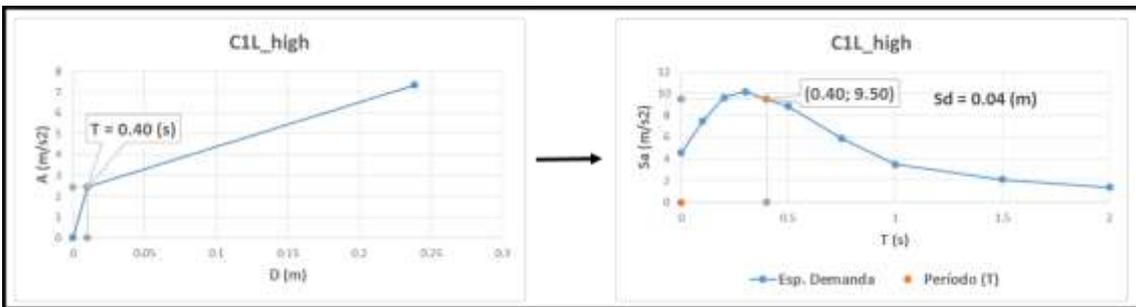


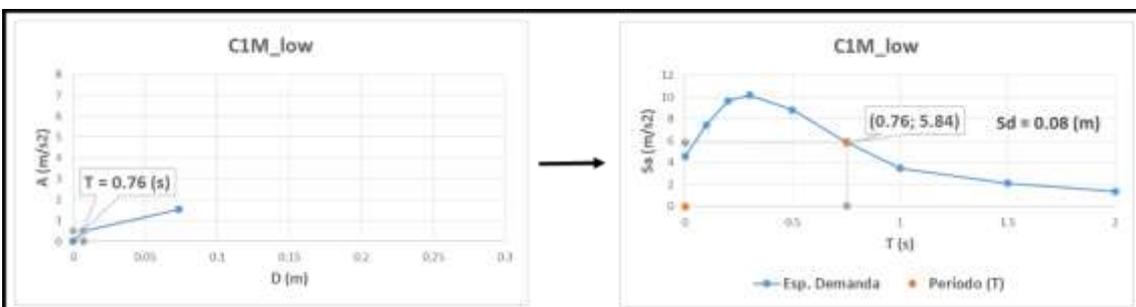
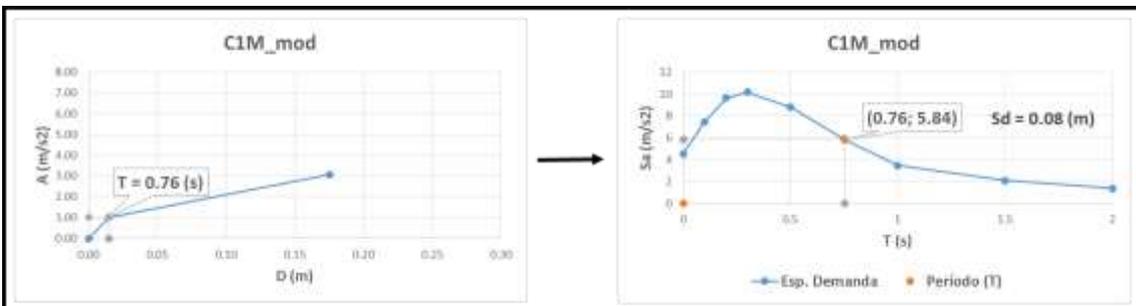
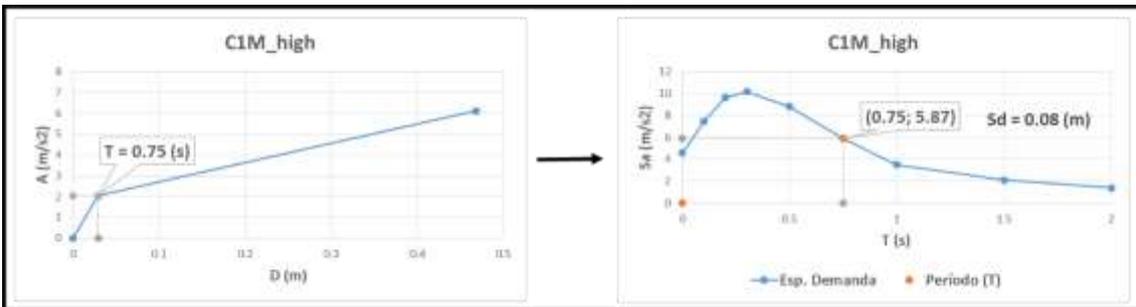
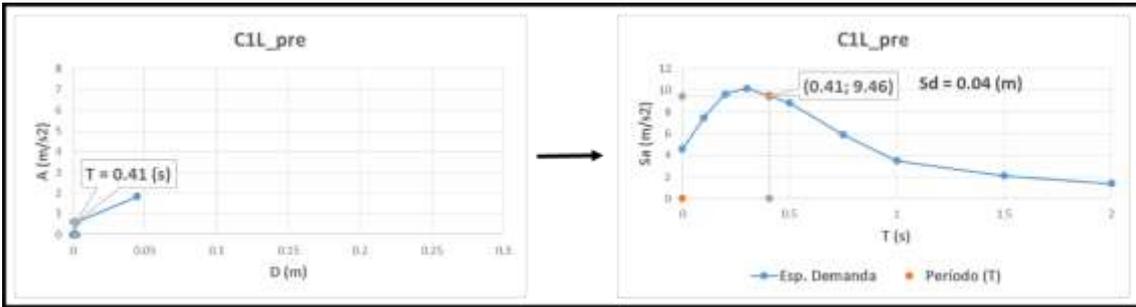
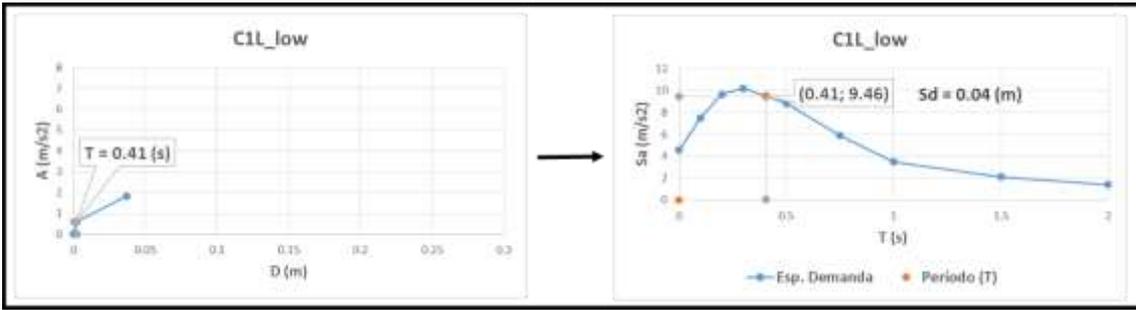


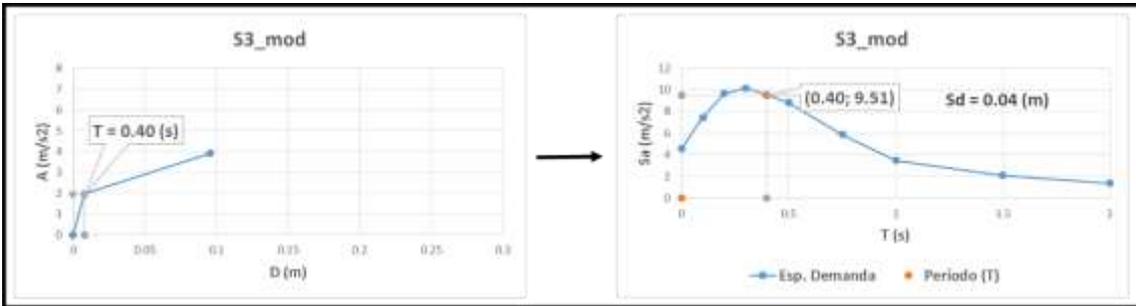
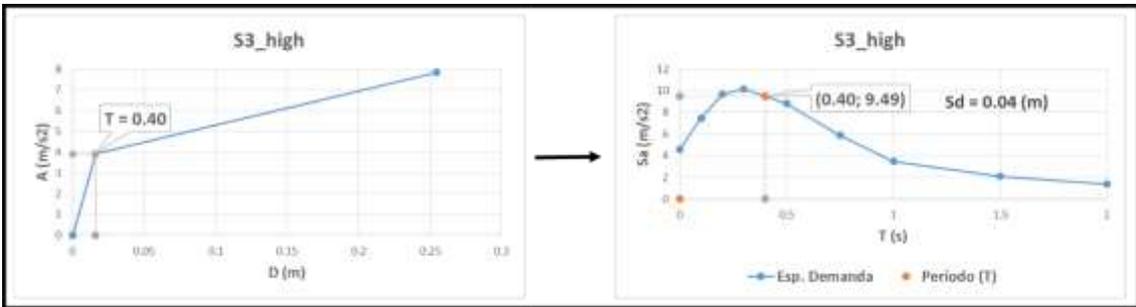
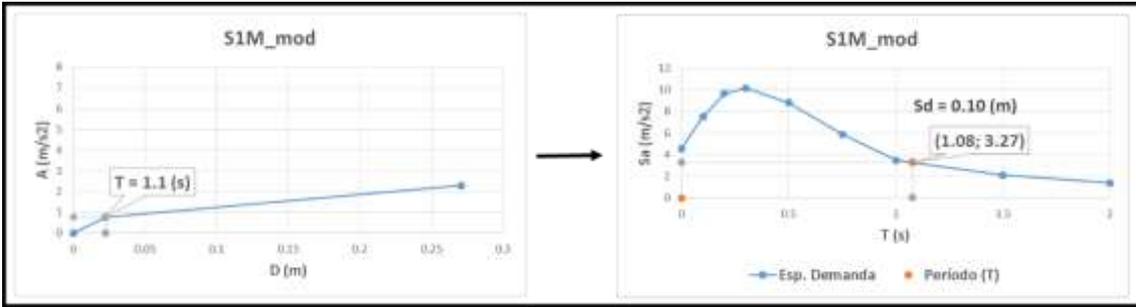
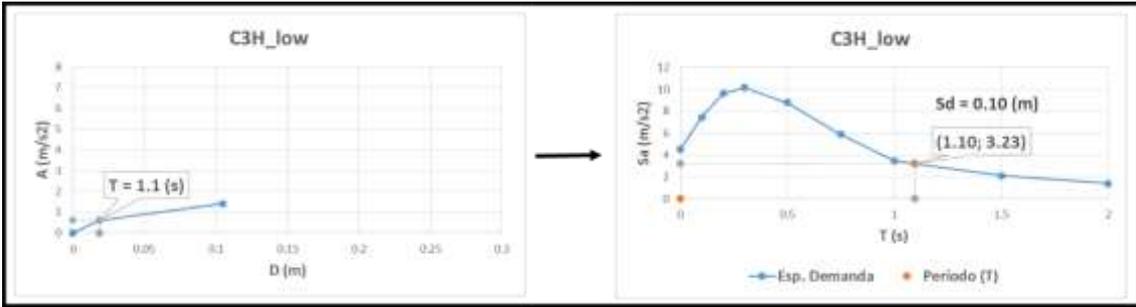
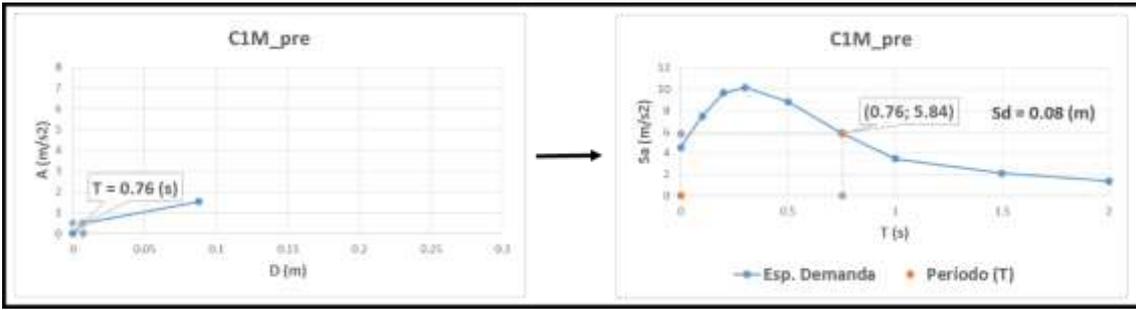


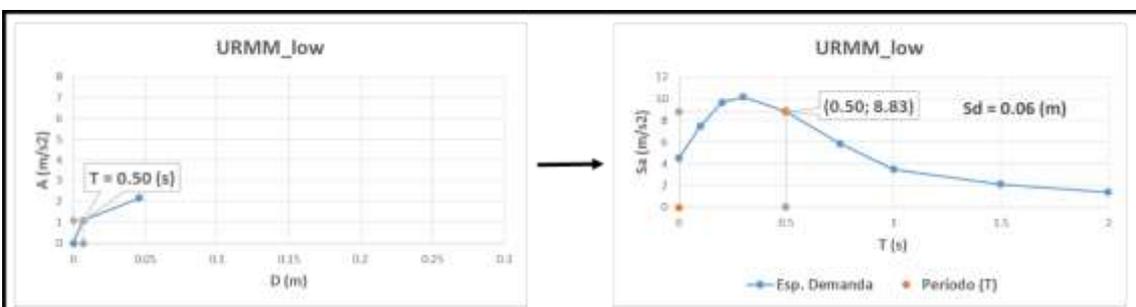
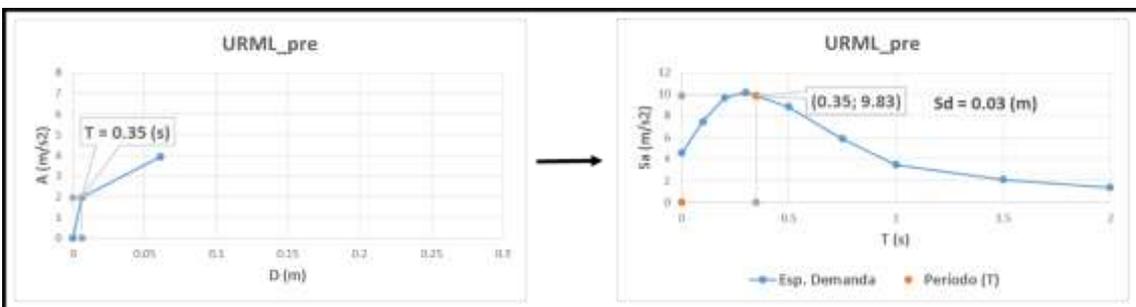
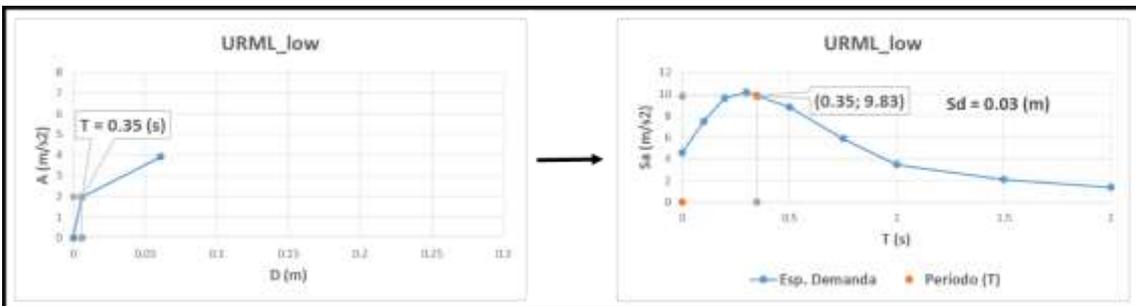
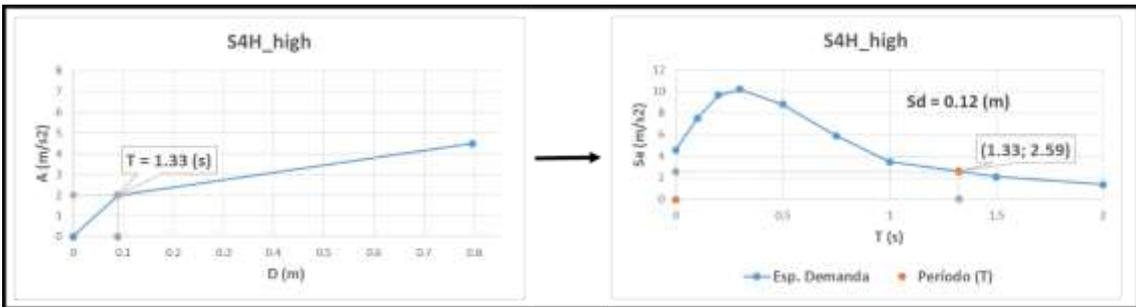
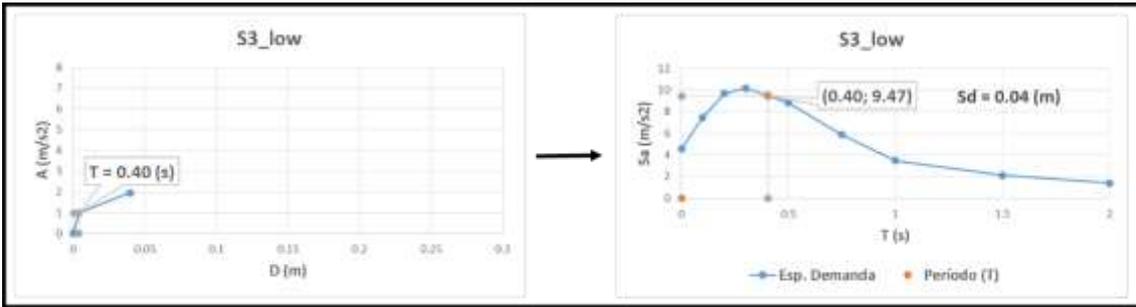


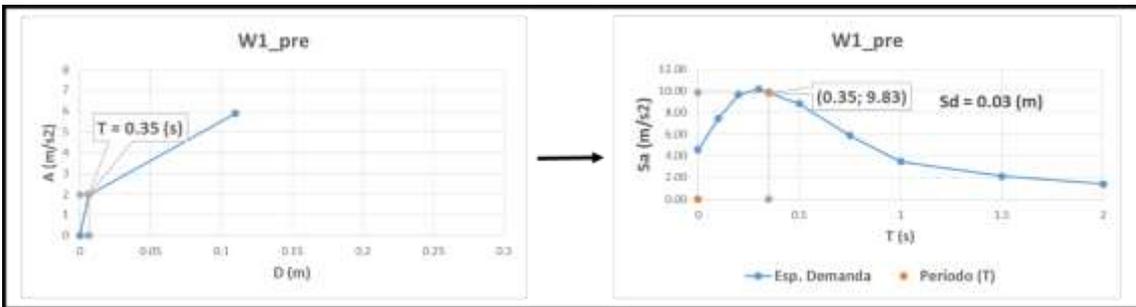
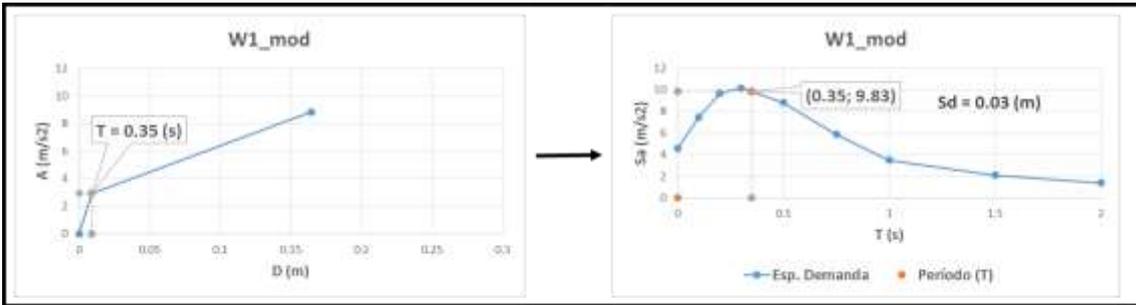
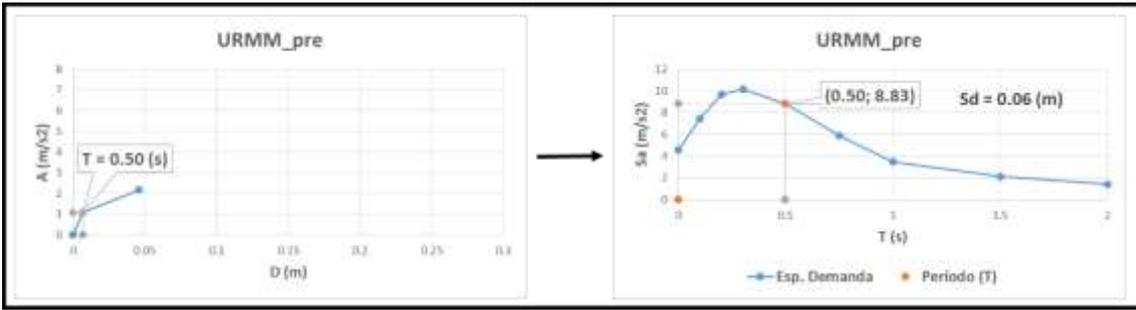
**BARRIO LA FLORESTA:**







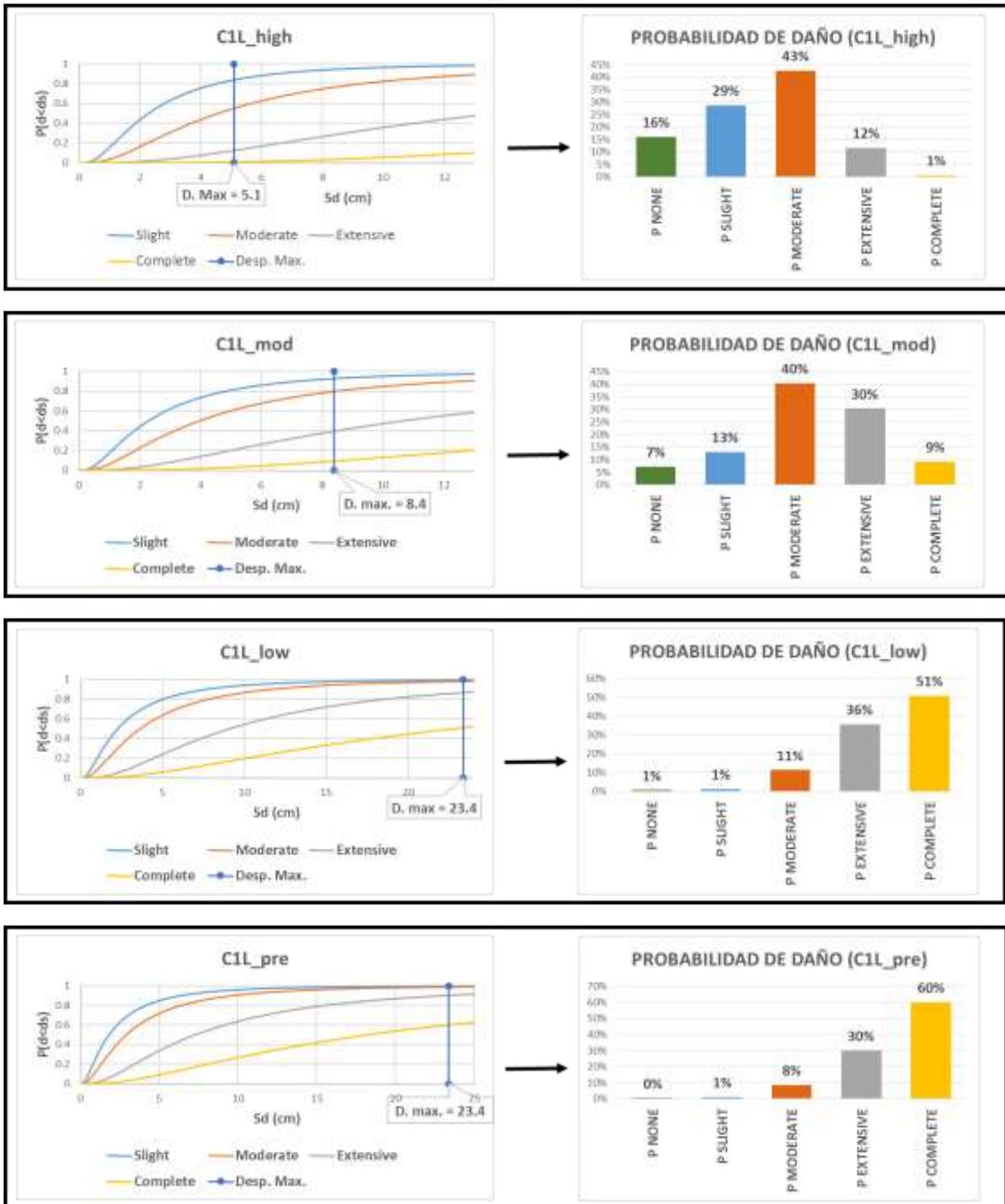


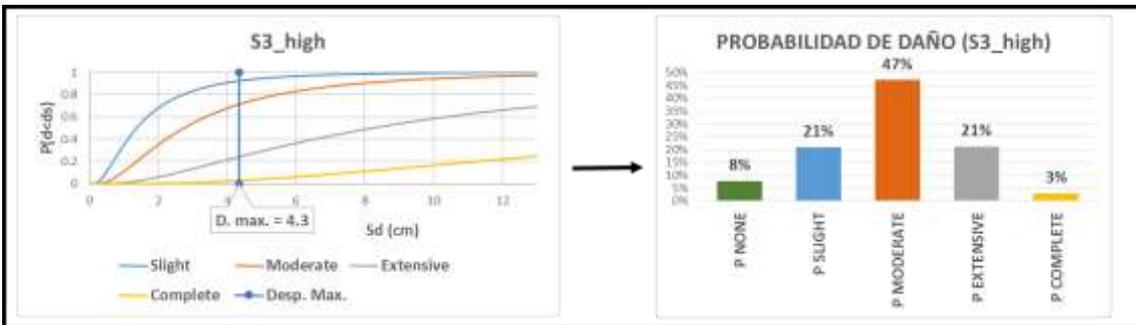
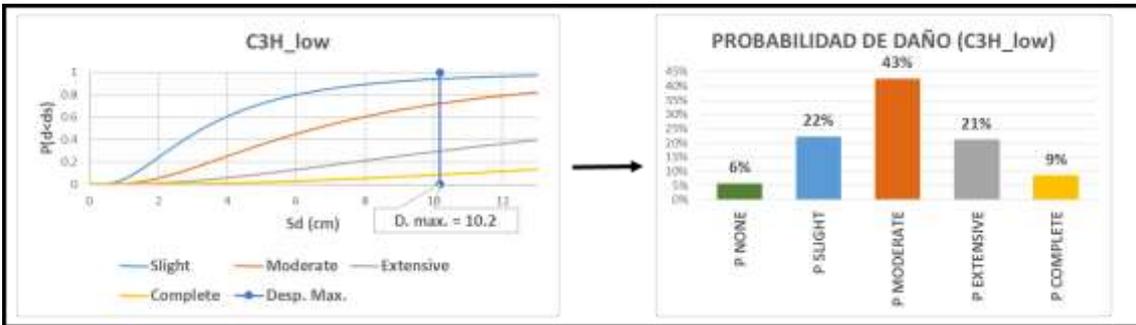
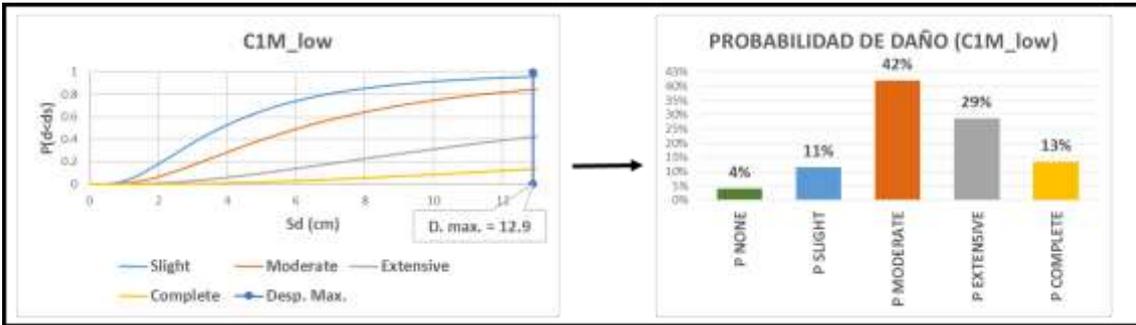
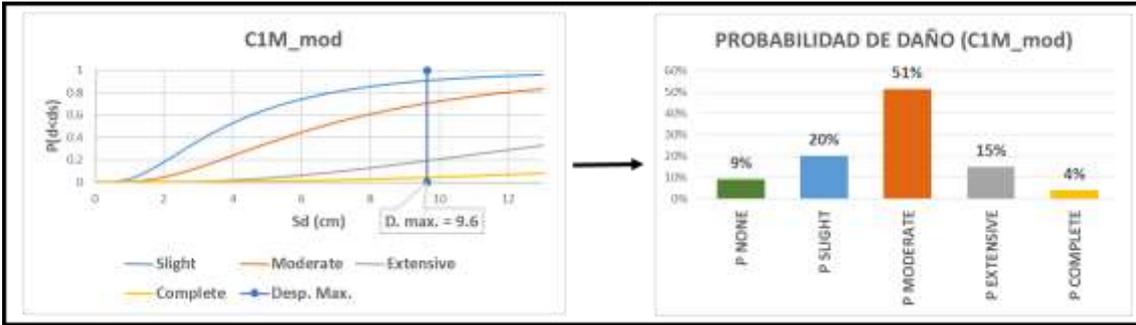
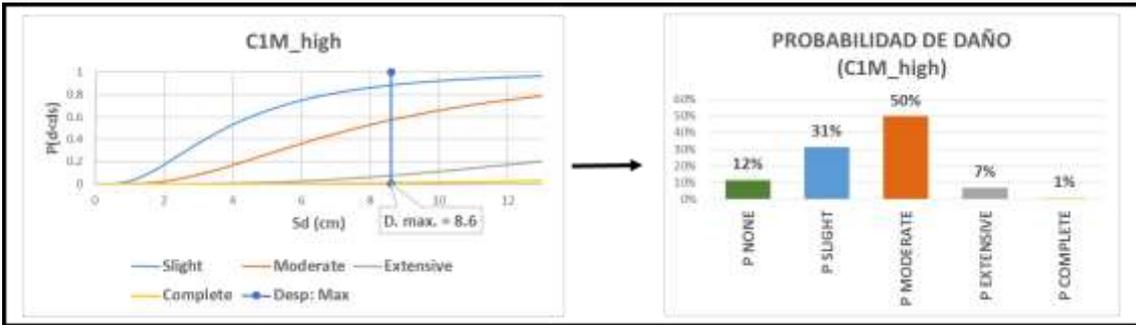


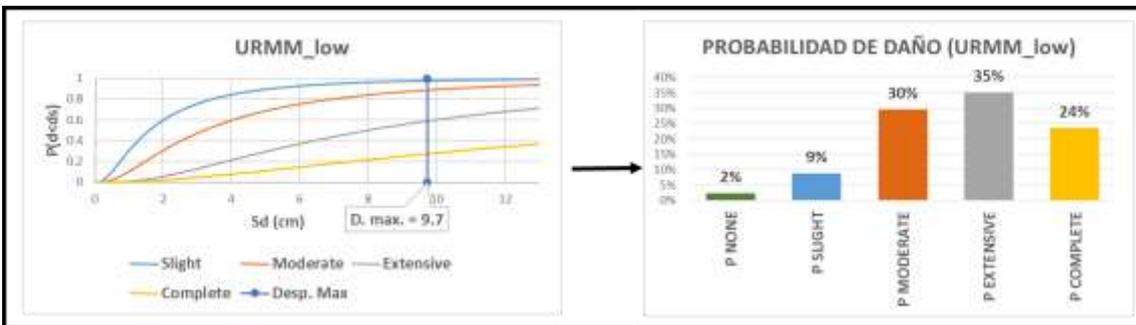
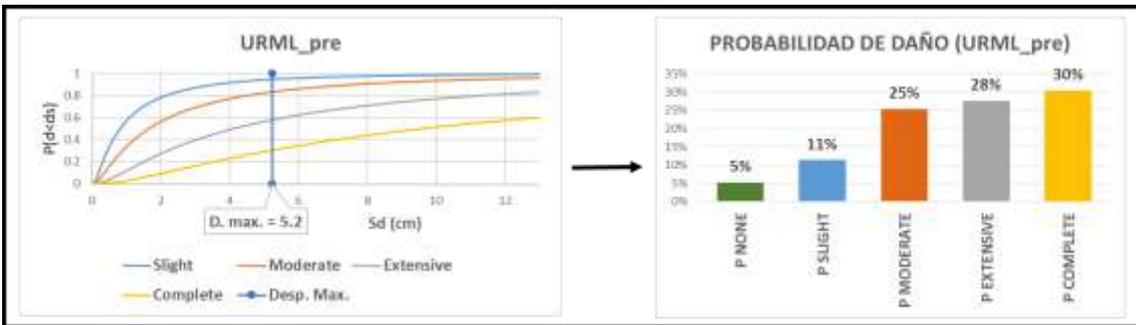
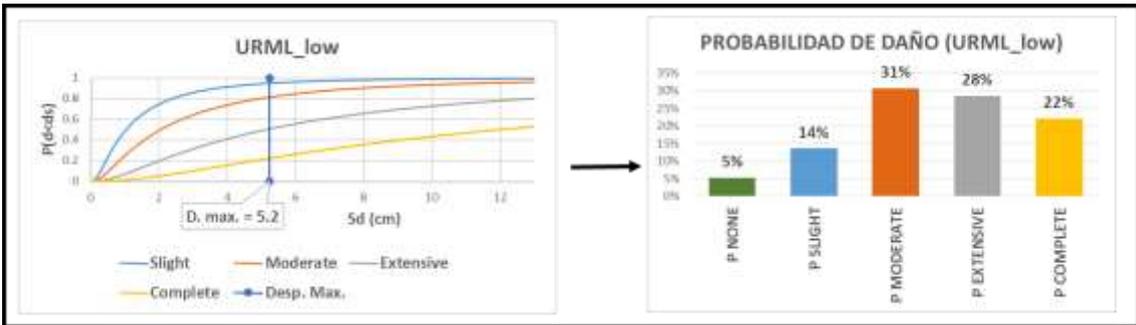
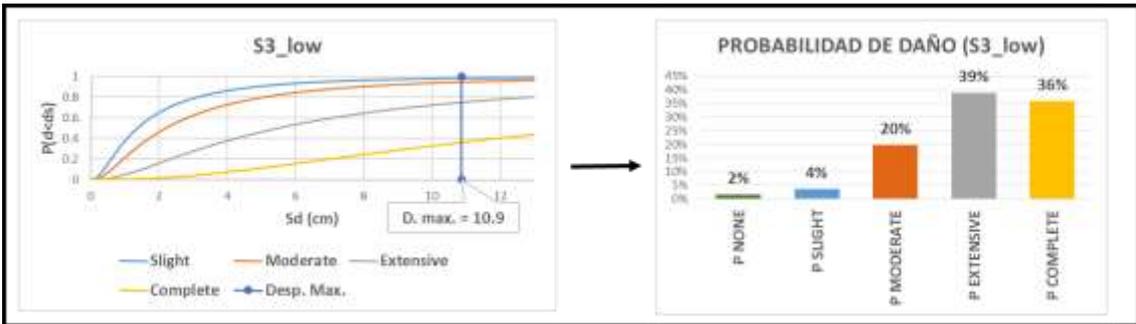
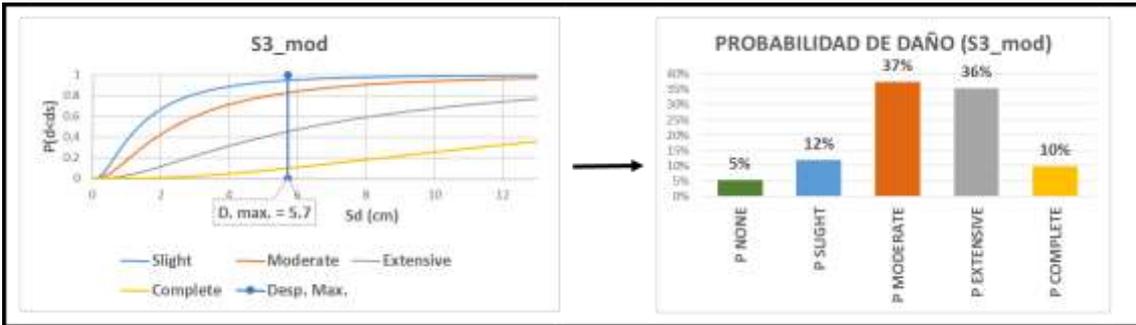
## ANEXO 5

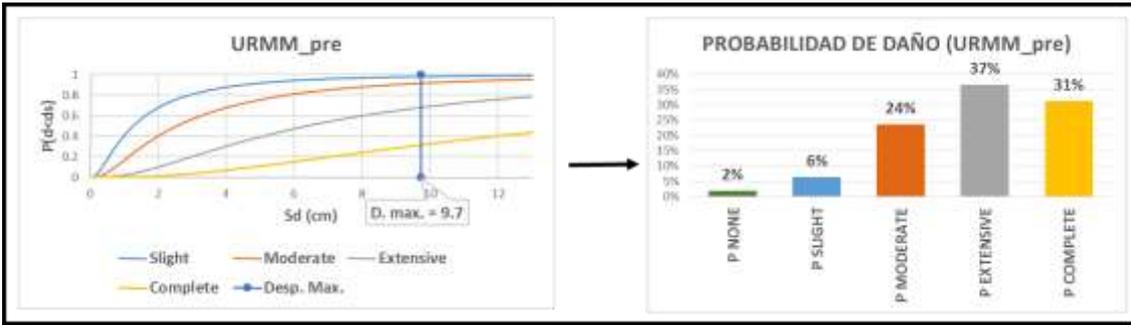
### (CAPÍTULO 5: PROBABILIDAD DE DAÑO EN LAS CLASES DE VULNERABILIDAD IDENTIFICADAS PARA EL ESCENARIO SÍSMICO DEFINIDO).

**BARRIO LA COLÓN:**

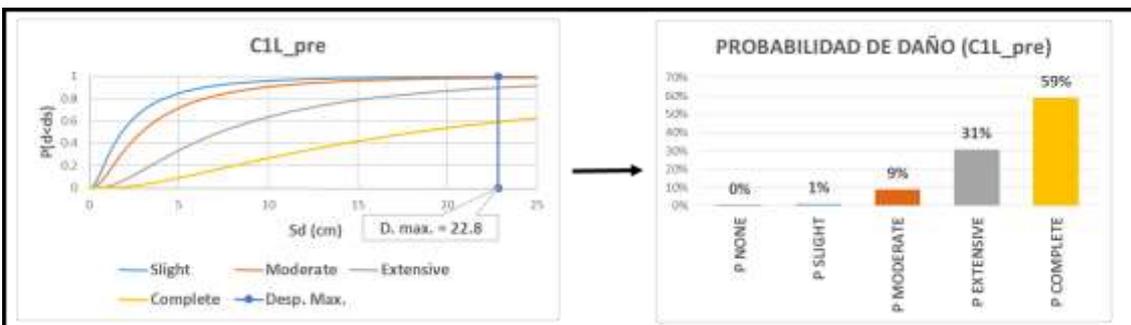
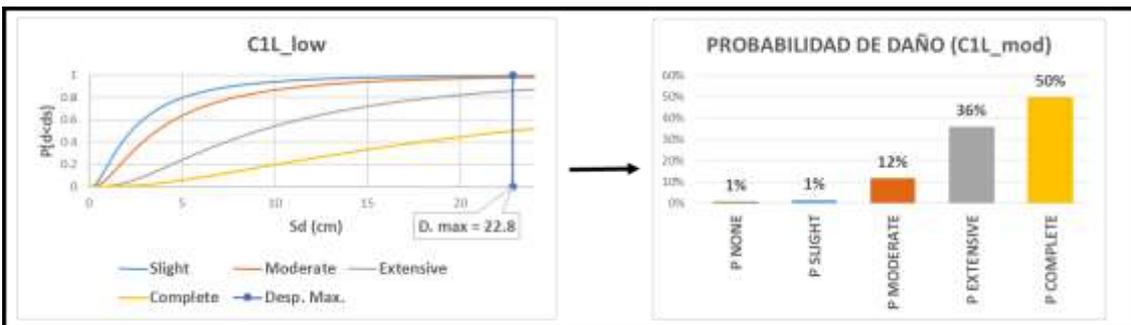
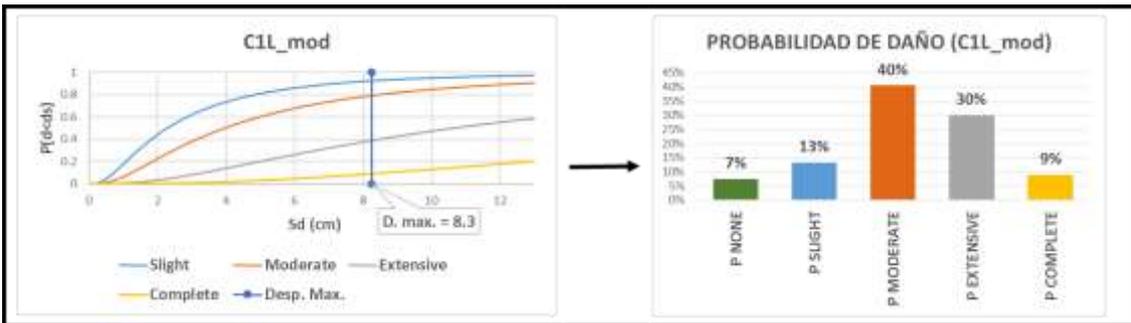
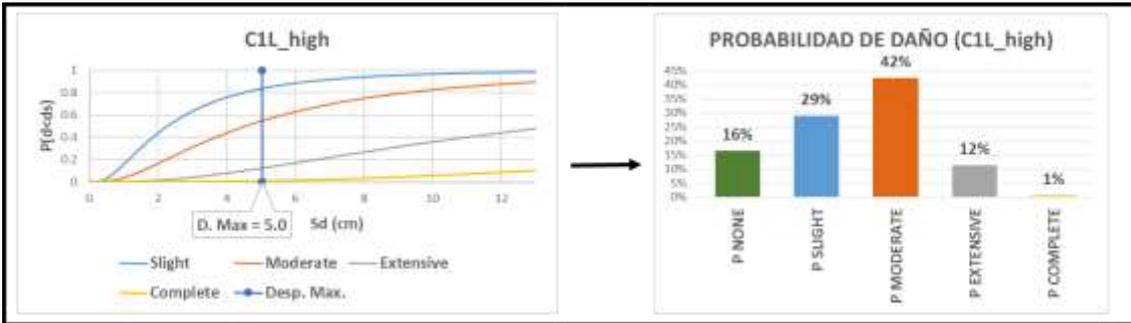


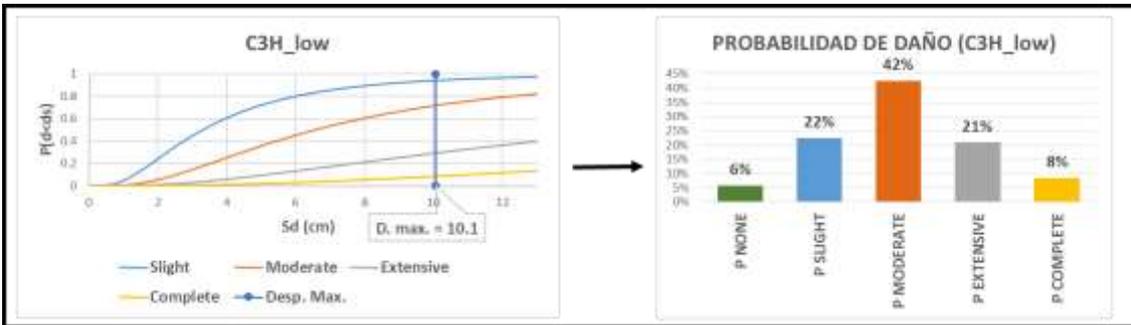
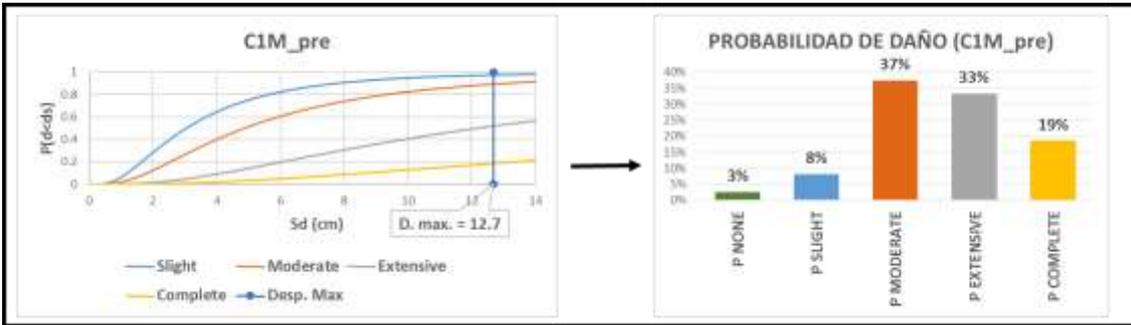
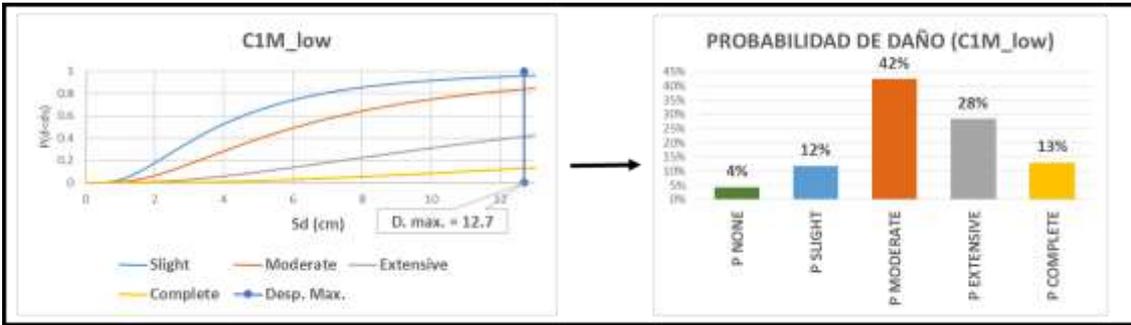
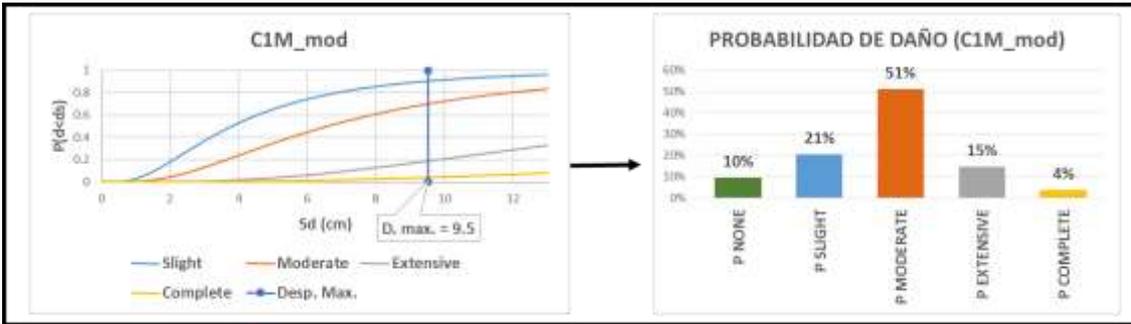
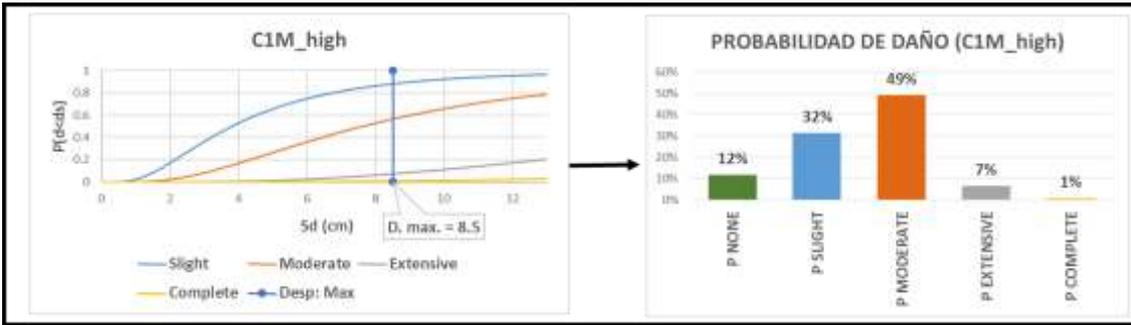


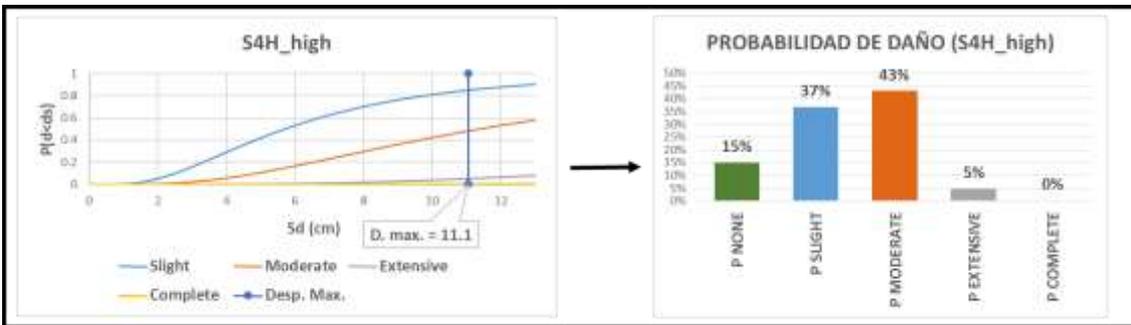
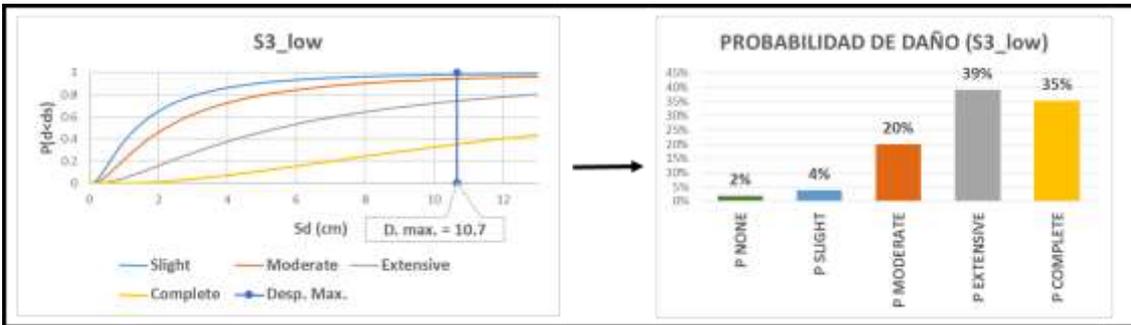
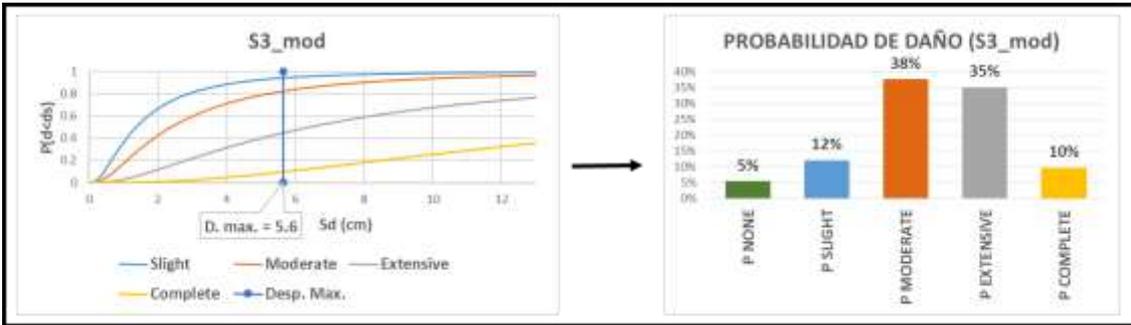
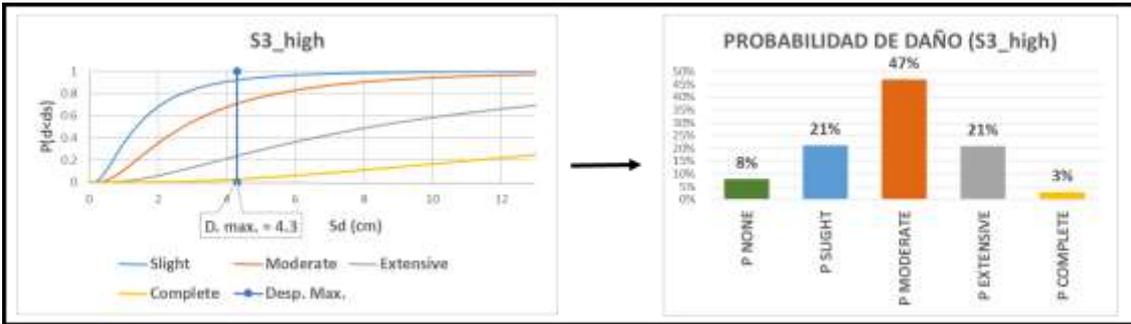
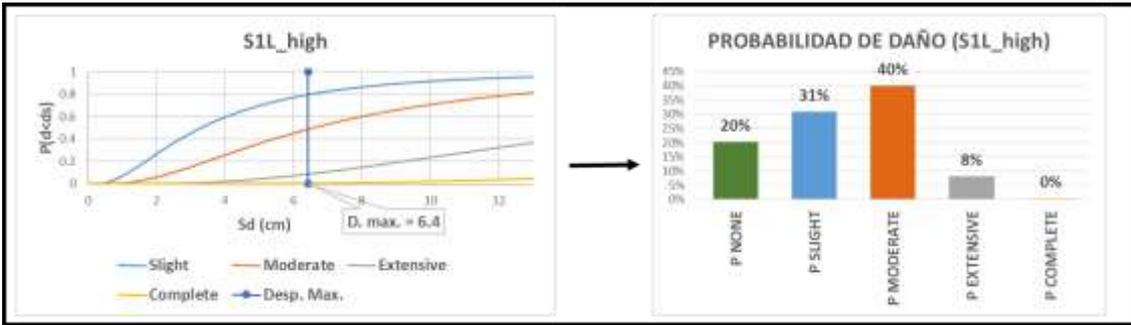


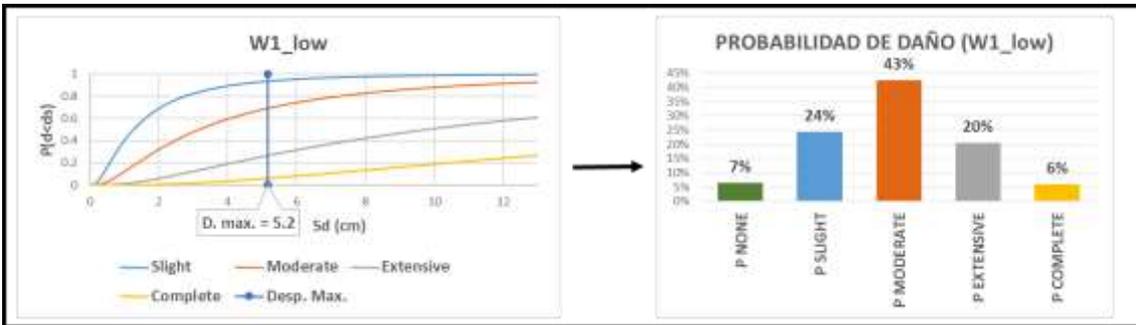
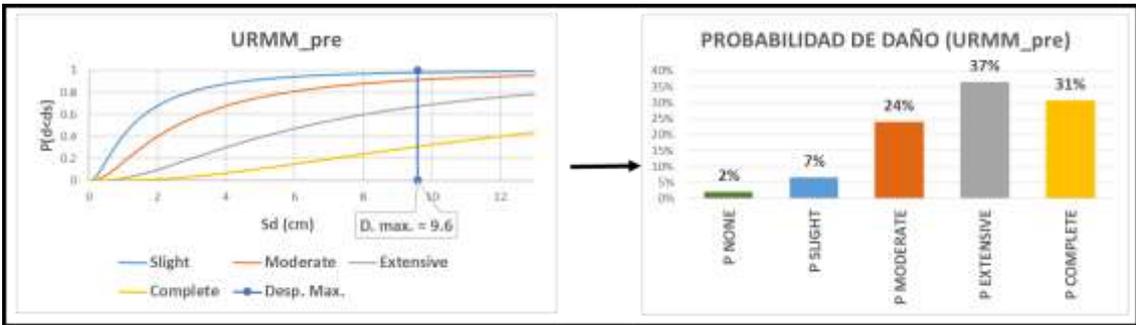
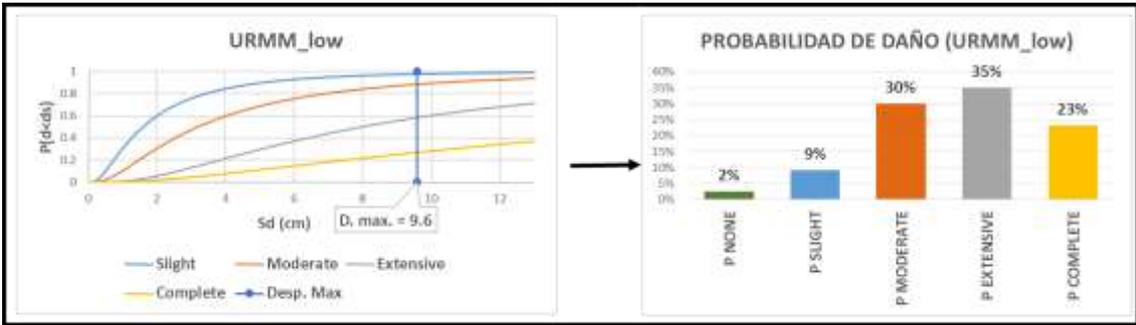
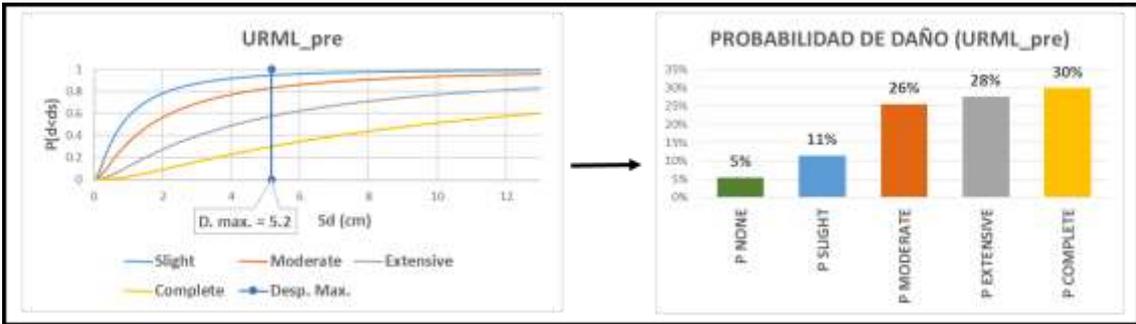
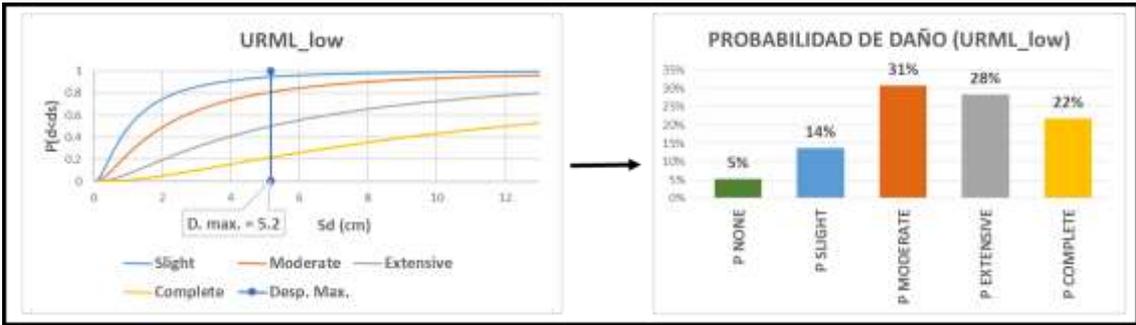


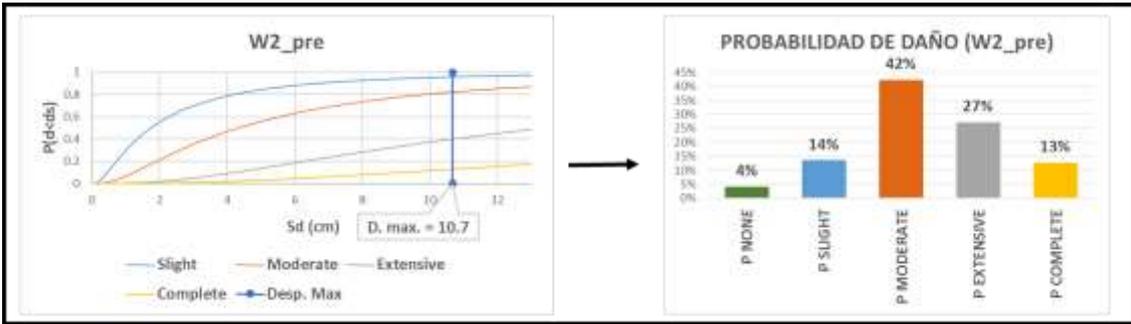
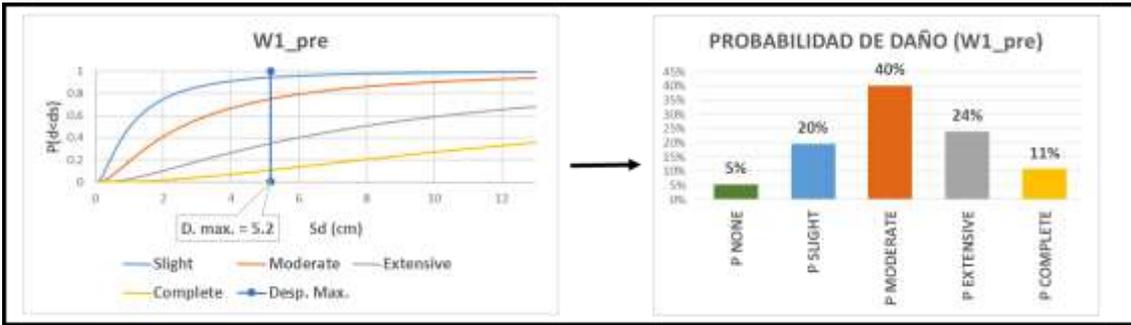
**BARRIO MARISCAL SUCRE:**











**BARRIO LA FLORESTA:**

