ANÁLISIS DE RECURRENCIA, PREDICCIÓN Y RIESGO DE LOS FACTORES SÍSMICOS DEL CENTRO DEL PAÍS: ESTUDIO DE CASO BOGOTÁ D.C

ANTEPROYECTO
MODALIDAD DE MONOGRAFÍA

PRESENTADO POR:

ANDRÉS DAVID MESA OSPINA

JUAN MANUEL MORENO GAMA

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA CATASTRAL Y GEODESIA

BOGOTÁ D.C

2018

ANÁLISIS DE RECURRENCIA, PREDICCIÓN Y RIESGO DE LOS FACTORES SÍSMICOS DEL CENTRO DEL PAÍS: ESTUDIO DE CASO BOGOTÁ D.C

ANTEPROYECTO
MODALIDAD DE MONOGRAFÍA

PRESENTADO POR:

ANDRÉS DAVID MESA OSPINA

JUAN MANUEL MORENO GAMA

DIRECTOR

Luis Fernando Gómez Rodríguez
Docente proyecto curricular de Ingeniería Catastral y Geodesia

CO-DIRECTOR: Andrés Cárdenas Contreras
Docente proyecto curricular de Ingeniería Catastral y Geodesia.

CO-DIRECTOR: María Belén Benito
Docente Universidad Politécnica de Madrid

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA CATASTRAL Y GEODESIA

BOGOTÁ D.C

2018

ANÁLISIS DE RECURRENCIA, PREDICCIÓN Y RIESGO DE LOS FACTORES SÍSMICOS DEL CENTRO DEL PAÍS: ESTUDIO DE CASO BOGOTÁ D.C

JURADO CALIFICADOR

Dr. Luis Fernando Gómez Rodríguez (Director) _____

Dr. José Abel Rico Báez _____

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN **15**

1.1. ESTRUCTURA DE LA MONOGRAFÍA 15
1.2. OBJETIVOS 16
1.2.1. Objetivo general 16
1.2.2. Objetivos específicos 16
1.3. ESTADO ACTUAL DEL TEMA 16
1.4. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN 17
1.4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 17
1.5. JUSTIFICACIÓN 17
1.6. ANTECEDENTES DE ESTUDIOS SÍSMICOS 18
1.7. ALCANCE DEL PROYECTO 20

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO **21**

2.1. EVENTOS SÍSMICOS 21
2.1.1. Mecanismos Focales y Tipos de Fallas 21
2.1.2. Transferencia de Esfuerzos de Coulomb 22
2.1.3. Teoría del Rebote Elástico 23
2.1.4. Norma Sismo Resistente Colombiana (NSR 10) 24
2.1.5. Escalas Sismológicas 25
2.2. RIESGO 25
2.2.1. Peligrosidad 26
2.2.2. Vulnerabilidad 26
2.2.3. Exposición 27
2.2.4. Costos 28
2.3. CARACTERIZACIÓN DE LA PELIGROSIDAD 28
2.3.1. Efecto Fuente 30
2.3.2. Ley de Recurrencia 30
2.3.3. Efecto de Propagación 30
2.3.4. Efecto Local 32
2.4. PREDICCIÓN SÍSMICA 35

CAPÍTULO 3. DATOS, MODELO Y METODOLOGÍA **36**

3.1. DATOS 36
3.1.1. Geología Estructural 36
3.2. MODELAMIENTO 38
3.3. METODOLOGÍA 39
3.3.1. Análisis del Problema 40
3.3.2. Método Probabilístico Zonificado 41
3.3.3. Análisis de Resultados 41

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RECURRENCIA, PREDICCIÓN Y RIESGO **43**

4.1. IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA 43
4.1.1. Análisis de la Sismicidad y la Tectónica de la Zona 44
4.1.2. Elaboración del Catálogo del Proyecto 45

4.1.3. Caracterización de las fuentes sísmicas 53
4.1.4. Modelos de Movimiento Fuerte o Leyes de Atenuación (GMPE) 61
4.1.5. Cálculo de la Amenaza Sísmica en Roca 63
4.1.6. Desagregación de la amenaza o peligrosidad 66
4.1.7. Análisis de los Suelos y su Efecto Amplificador para la Ciudad de Bogotá D.C. 69
4.1.8. Factores de Amplificación Según NERPH y NSR10. 71
4.1.9. Caracterización del efecto local. 73

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS Y RESULTADOS 74

5.1. MAPAS DE ACELERACIÓN EN ROCA. 74
5.2. MAPAS DE ACELERACIÓN CON EFECTO LOCAL ASOCIADO. 78
5.3. ESPECTROS RESULTANTES. 82
5.3.1. Espectros según la norma sismo resistente colombiana NSR-10. 82
5.3.2. Comparación de los espectros UHS del proyecto y espectros NSR-10. 83

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 87

7. BIBLIOGRAFÍA 89

8. GLOSARIO 92

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Parámetros focales de la falla. 21
Ilustración 2: Tipos de fallas 21
Ilustración 3: Mecanismos focales de los principales tipos de fallas 22
Ilustración 4: Ejemplificación Transferencia de esfuerzos de Coulomb 23
Ilustración 5: Deformación terrestre 24
Ilustración 6: Resonancia constructiva y destructiva. 34
Ilustración 7: Metodología general del proyecto de investigación. 42
Ilustración 8: Preparación de las entradas de datos. 43
Ilustración 9: Ajuste de regresión lineal para las Magnitudes. 47
Ilustración 10: Análisis de completitud completa para sismo entre 3.07 y 4.8. 49
Ilustración 11: Análisis de completitud para los años entre 1911 y 2000. 49
Ilustración 12: Análisis de completitud con años de referencia entre 1993 y 2013. 50
Ilustración 13: Aplicación de ley Gutenberg-Richter. 57
Ilustración 14: Zonas de amenaza sísmica Colombia. 64
Ilustración 15: Zonas de amenaza sísmica Colombia. Fuente: (NSR 10, 2010). 65
Ilustración 16: Desagregación del cálculo probabilístico para PGA con un periodo de retorno de 475 años. 67
Ilustración 17: Desagregación del cálculo probabilístico para PGA con un periodo de retorno de 975 años. 67
Ilustración 18: Desagregación del cálculo probabilístico para un periodo de 1.0 segundos con un periodo de retorno de 475 años. 68
Ilustración 19: Desagregación del cálculo probabilístico para un periodo de 1.0 segundos con un periodo de retorno de 975 años. 68
Ilustración 20: Factores de amplificación según el PGA y la clasificación de suelos de la NEHRP. 71
Ilustración 21: Factores de amplificación según el S.s. y la clasificación de suelos de la NEHRP. 72
Ilustración 22: Factores de amplificación según el S1. y la clasificación de suelos de la NEHRP. 73
Ilustración 23: Definición del espectro de diseño respecto a sus coeficientes. 83
Ilustración 24: Espectros de diseño respecto a la microzonificación sísmica de Bogotá D.C. 84
Ilustración 25: Espectros de respuesta omitiendo el efecto sitio. 84
Ilustración 26: Espectro de respuesta atenuado y sin atenuar para cada clasificación del suelo de la zona de emplazamiento. 85
Ilustración 27: Relación entre los espectros de respuesta y los espectros de diseño. 86

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Escala de Mercalli..... 25
Tabla 2: Clasificaciones del suelo..... 33
Tabla 3: Valores del factor de atenuación para las zonas de períodos cortos del espectro..... 33
Tabla 4: Capacidad de predicción..... 35
Tabla 5: Sismos con daños intermedios y severos en Bogotá D.C. 45
Tabla 6: Años de referencia para el análisis de completitud 48
Tabla 7: Catalogo sísmico depurado. 50
Tabla 8: Diccionario de entidades del catálogo sísmico. 51
Tabla 9: Parámetros de la zonificación sísmica – Temporal. 58
Tabla 10: Parámetros de la zonificación sísmica – Espacial. 59
Tabla 11: Magnitudes máximas de las fuentes. 60
Tabla 12: Comparación estadística de los modelos. 66
Tabla 13: Sismos de control por desagregación, tasa de retorno 475 años..... 69
Tabla 14: Sismos de control por desagregación, tasa de retorno 975 años..... 69
Tabla 15: Clasificación de la NEHRP según el valor VS. 70
Tabla 16: Factores de amplificación según el PGA y la clasificación de suelos de la NERHP. .. 71
Tabla 17: Factores de amplificación según el Ss. y la clasificación de suelos de la NERHP. 72
Tabla 18: Factores de amplificación según el S1. y la clasificación de suelos de la NEHRP. 73
Tabla 19: Coeficientes espectrales de diseño para un coeficiente de amortiguamiento igual al 5% del crítico. 83

LISTA DE MAPAS

Mapa 1: Fallas geológicas de Colombia 36
Mapa 2: Localización de Bogotá en Colombia. 37
Mapa 3: Fallas geológicas zona de influencia Bogotá D.C. 37
Mapa 4: Catálogo cortical en zona de influencia en Bogotá D.C. 52
Mapa 5: Catálogo interfase en zona de influencia en Bogotá D.C. 52
Mapa 6: Catálogo intraplaca en zona de influencia en Bogotá D.C. 53
Mapa 7: Zonas sismo-genéticas temporales en Bogotá D.C. 55
Mapa 8: Zonas sismo-genéticas especiales en Bogotá. 56
Mapa 9: Clasificación de suelos de Bogotá según la NEHRP. 70
Mapa 10: Peligrosidad sísmica en roca con aceleración espectral PGA y periodo de retorno de 475 años. 75
Mapa 11: Peligrosidad sísmica en roca con aceleración espectral 0,1 segundos y periodo de retorno de 475 años. 75
Mapa 12: Peligrosidad sísmica en roca con aceleración espectral 1,0 segundos y periodo de retorno de 475 años. 76
Mapa 13: Peligrosidad sísmica en roca con aceleración espectral PGA y periodo de retorno de 975 años. 76
Mapa 14: Peligrosidad sísmica en roca con aceleración espectral 0,1 segundos y periodo de retorno de 975 años. 77
Mapa 15: Peligrosidad sísmica en roca con aceleración espectral 1,0 segundos y periodo de retorno de 975 años. 77
Mapa 16: Peligrosidad sísmica en suelo con aceleración espectral PGA y periodo de retorno de 475 años. 78
Mapa 17: Peligrosidad sísmica en suelo con aceleración espectral 0,1 segundos y periodo de retorno de 475 años. 79
Mapa 18: Peligrosidad sísmica en suelo con aceleración espectral 1,0 segundos y periodo de retorno de 475 años. 79
Mapa 19: Peligrosidad sísmica en suelo con aceleración espectral PGA y periodo de retorno de 975 años. 80
Mapa 20: Peligrosidad sísmica en suelo con aceleración espectral 0,1 segundos y periodo de retorno de 975 años. 81
Mapa 21: Peligrosidad sísmica en suelo con aceleración espectral PGA y periodo de retorno de 975 años. 81
Mapa 22: Zonas de amenaza sísmica en Colombia según la NRS – 10 con un periodo de retorno de 475 años. 82

Dedicatoria.

A nuestra familia: Sobretodo a nuestros padres,
Por el apoyo prestado a lo largo de nuestra vida universitaria
Consejos y enseñanzas que forjaron en nosotros a lo largo del tiempo.

A nuestra universidad por habernos permitido
Adquirir un bagaje de conocimientos y experiencias
Enriquecedoras para nuestra vida.

A nuestro país por demostrarnos que la vida
Está llena de peldaños que debemos superar, por enseñarnos
A nunca desfallecer a pesar de las adversidades.

Los Autores Agradecen:

A la Dra. Belén Benito Oterino por toda su asesoría en el desarrollo de este proyecto a pesar de la difícil comunicación entre España y Colombia, por el conjunto de conocimientos brindados en el ámbito de la gestión del riesgo sísmico e interés en el desarrollo de estas temáticas en América Latina.

Al Profesor Andrés Cárdenas Contreras, como co-director, orientador de la tesis, especialmente por sus aportes en el ámbito de metodología de la investigación y aporte como ingeniero catastral y geodesta con sus conocimientos en geofísica.

Al Profesor Luis Fernando Santa Guzmán, por su colaboración en la consolidación de la propuesta y ajuste de los procesos estadísticos involucrados en la gestión de riesgo.

Al Ing. Mario Silva por su colaboración, paciencia y aportes invaluables en la revisión del proyecto, a parte de su motivación permanente en el transcurso de la investigación.

A la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, especialmente a la carrera de Ingeniería Catastral y Geodesia por sus valiosas enseñanzas en la materia, ya que fueron el foco para el planteamiento y realización de este proyecto.

Al grupo de investigación SIMO del grupo de ingeniería sísmica: Dinámica de suelos y estructuras de la UPM – Universidad Politécnica de Madrid, por su paciencia al colaborarnos con la búsqueda de información y asesoría en la realización del proyecto.

LISTA DE SIMBOLOS

ϕ	*Azimut [0, 360°]*
δ	*Buzamiento (Gap, dip) [0, 90°]*
λ	*Ángulo de desliz o barrido (slip) [-180, 180]*
PU	*Precio unitario*
CR	*Costos de reparación*
ST	*Superficie total construida*
PC	*Probabilidad de daño completo*
H	*Peligrosidad*
$x(s)$	*Probabilidad de excedencia del parámetro x*
t	*Tiempo*
PGD	*Peak ground displacement (desplazamiento pico del suelo)*
PGV	*Peak ground velocity (velocidad pico del suelo)*
PGA	*Peak ground acceleration (Aceleración pico del suelo)*
SA	*Spectral acceleration (Aceleración espectral)*
M	*Magnitud*
M máx.	*Magnitud Máxima*
M min.	*Magnitud Mínima*
R	*Distancia focal, Distancia radial*
h	*Profundidad*
A	*Atenuación*
V	*Velocidad*
T	*Tensión*
M	*Densidad*
Ml	*Magnitud local*
Mw	*Magnitud momento*
Ms	*Magnitud de ondas superficiales*
Mb	*Magnitudes de ondas de cuerpo*
Me	*Magnitud de energía*
Md	*Magnitud de duración*
P	*Estimación de la peligrosidad espacial*
d	*Distancia radial*
f_M	*Factor de magnitud del sismo*
f_R	*Factor de distancia (focal)*
f_ε	*Facto de épsilon*
$\tau(M)$	*Tasa acumulada de sismos*
$N(M)$	*Número de terremotos de magnitud M*
TC	*Tasa de completitud*

PGAs	*PGA resultante, ver PGA*
PGAr	*PGA de referencia, ver PGA*
GMPES	*Ground Motion Prediction Equation (Ecuación de predicción de movimiento)*
SGC	*Servicio Geológico colombiano*
Vs30	*Velocidad de cizalla a una profundidad de 30 metros*
To	*Periodo inicial*
Tc	*Periodo corto*
Tl	*Periodo largo*
Am	*Aceleración máxima*
An	*Aceleración Nominal*
Fa	*Factor de amplificación*
Fv	*Factor de amplificación de la aceleración en el intervalo de velocidades constantes*
NEHRP	*National Earthquake Hazards Reduction Program (Programa Nacional para la Reducción del Riesgo Sísmico)*
NSR-10	*Norma Sismo resistente colombiana*
GEM	*Global Earthquake Model (Modelo Global de Terremotos)*

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

El presente proyecto tiene como finalidad evaluar la peligrosidad sísmica de la ciudad de Bogotá D.C mediante la implementación del método probabilístico zonificado, en el cual se establecerá el estudio de la amenaza y recurrencia de los sismos que tienen influencia en la ciudad, en función de las variables sísmicas. Teniendo en cuenta lo anterior, es necesario identificar las condiciones físicas de las fallas, la geología de la zona, los efectos del evento sísmico en el suelo, entre otras características.

A partir de las variables sísmicas: distancia, magnitud y profundidad, se generarán dos modelos: el primero de tipo clásico, y el segundo de tipo espacial. Para desarrollar ambos modelos es necesario la recopilación de la información de los eventos sísmicos relevantes, donde se analizarán los periodos de tiempo con diversos rangos de magnitud momento (Mw), con el fin de obtener un rango de tiempo para su estudio (análisis de completitud) y el segundo establece un sistema de pesos; donde se hace una relación espacial inversa entre la influencia del sismo en la ciudad, la distancia del evento sísmico al centroide de la ciudad y la profundidad del sismo, y una relación directa entre la influencia del sismo en la ciudad y la magnitud momento del sismo (Mw).

Por medio de los modelos expuestos podremos relacionar las características sísmicas y físicas de las fallas (tectónica) con la peligrosidad probabilística y espacial (modelo empírico) de la ciudad, determinando el comportamiento ante un sismo (es decir la amplificación o de-amplificación de la onda sísmica en caso de un movimiento fuerte).

Acto seguido, se identifica la probabilidad de un evento sísmico en un periodo de tiempo (años de retorno), determinando un rango de profundidad y magnitud. Esta metodología permite el desarrollo de mapas de peligrosidad y espectros de respuesta respecto al movimiento fuerte más probable en ocurrencia en la zona de emplazamiento.

Finalmente se genera una unidad de análisis, el cual busca interpretar el cruzamiento de datos y con ello predecir los escenarios de un posible sismo y mediante esa predicción poder caracterizar la peligrosidad con el objetivo de prevención (gestión del riesgo) y atención de emergencias en Bogotá.

1.1. ESTRUCTURA DE LA MONOGRAFÍA

En el *Capítulo 1* se presenta los elementos fundamentales para la definición del proyecto, como la introducción, los objetivos, estado actual de la temática a manejar, la pregunta de investigación, el planteamiento del problema, justificación, metodología y el alcance del proyecto, permitiendo identificar a total cabalidad el trabajo desarrollado. El *Capítulo 2* se centra en el marco teórico implementado para el desarrollo de la monografía como son los eventos sísmicos entre ellos los mecanismos focales, la teoría del rebote elástico, la transferencia de esfuerzos de Coulomb, las escalas de medición, además, se presenta la teoría del riesgo con enfoque sísmico, donde se expone sus variables involucradas como la peligrosidad, vulnerabilidad, exposición y costos; ahondando en la variable de riesgo a estudiar: la peligrosidad sísmica, en donde se plantean los principios de la caracterización de la peligrosidad y los parámetros que influyen en su modelamiento, recalcando

la predicción sísmica en este contexto. En el *Capítulo 3* se evidencian los datos, modelo y la metodología utilizada para el proyecto. El *Capítulo 4* se centra en el análisis de recurrencia, predicción y riesgo donde se encuentran los factores fundamentales para la elaboración del proyecto es decir la implementación de la metodología. El *Capítulo 5* se evidencian los análisis de resultados obtenidos en el capítulo anterior, principalmente los mapas de aceleración en roca e incluyendo el efecto local, además de mostrar los espectros resultantes del proyecto. Finalmente encontramos tres apartados en los cuales se anexan las conclusiones y recomendaciones a tener en cuenta para su profundización en proyectos futuros, Bibliografía y un glosario de términos relevantes.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo general

Analizar la recurrencia, la predicción y el riesgo de los factores sísmicos sobre la ciudad de Bogotá D.C.

1.2.2. Objetivos específicos

- Evaluar la amenaza sísmica presente en el centro de Colombia especialmente el caso de Bogotá a través de modelos de caracterización de la peligrosidad sísmica.

- Verificar la aplicación de la norma sismo resistente colombiana (NSR 10), según los espectros encontrados.

- Seleccionar acorde a las características topográficas y geológicas del emplazamiento el modelo GMPE correspondiente a cada una de las profundidades especificadas.

1.3. ESTADO ACTUAL DEL TEMA

Actualmente, en Colombia la temática sobre los planes de acción relacionados a eventos sísmicos se encuentra ampliamente estudiado ya que se encuentran gran variedad de proyectos relacionados con la prevención de desastres, especialmente asociadas con planes a corto y medio plazo, tal y como son los reforzamientos estructurales (NSR 10), los planes de evacuación y su difusión en la comunidad.

Los estudios sísmicos surgieron a partir de narraciones históricas, en el cual se recopila la información asociada a un evento sísmico a través de textos que relataban su impacto, algunos años después surgió el sismógrafo, inventado por el físico James Forbes et al (1842), a partir de la medición surge un modelo de categorizar los sismos planteado por Charles Richter con la colaboración de Beno Gutenberg denominado la escala sismológica Richter et al (1935). Los modelos de atenuación acordes a las características de Bogotá son Zhao et. al (2006) y Youngs et. al (1997); se presenta una metodología sobre la peligrosidad PHA (1997). Se establece una correlación entre magnitud momento Mw, con magnitud de ondas superficiales Ms y magnitud de ondas internas Mb, propuestas por Scordilis (2006). Para caracterizar las fuentes sísmicas que

entrarán en el cálculo de peligrosidad se ha empleado la metodología clásica zonificada (MCZ), este método fue desarrollado por Cornell (1968).

Actualmente, se trabaja sobre el estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia (1996); además, se han generado estudios sobre riesgos sísmicos como en Ibagué por parte de la profesora Benito et al (2016) estudios en Centroamérica sobre la caracterización de la peligrosidad por la profesora Benito et. al (2016).

1.4. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cuál es la amenaza sísmica presente en la ciudad de Bogotá D.C. según la metodología zonificada y su relación con la Norma Sismo Resistente Colombiana actual (NSR-10)?

1.4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente, existen diversos procesos de construcción en Bogotá, siendo la ciudad con el mayor nivel de desarrollo urbano en Colombia. Sin embargo, lamentablemente por la ausencia de control del Estado donde no se demuestran procesos concretos para evitar la presencia de construcciones deficientes y la falta de actualización de la normatividad que incrementa la amenaza sísmica en las viviendas, conllevando el aumento de la peligrosidad y vulnerabilidad de los habitantes de la vivienda ante un evento sísmico.

Por consiguiente, es necesario recopilar, integrar y producir información técnica para de manera apropiada predecir, prever, prevenir el riesgo en la ciudad. Mediante la comparación espacial entre las construcciones, el suelo y los movimientos fuertes podemos gestionar los riesgos a partir de la geofísica y la geoestadística para generar un modelo espacial donde se evidencie la peligrosidad en Bogotá.

Actualmente, los estudios en Colombia son enfocados a la relación entre los movimientos fuertes de la tierra y la población de la zona, es por ello que se estudia el caso de la capital colombiana. La razón nace porque Bogotá presenta la mayor población del país, tiene una dinámica de construcción alta y densificada y contiene una diversificación de características físicas del suelo, por lo tanto, se genera la necesidad de crear análisis de los riesgos, comprendidos en la presente monografía a partir de una peligrosidad.

1.5. JUSTIFICACIÓN

El análisis de recurrencia, predicción y riesgo a partir de un estudio sismológico se origina a partir de la necesidad de gestionar el riesgo. Colombia no se encuentra entre los 20 países más sísmicos del mundo, sin embargo, colindamos con algunos países que sí lo son, como Perú y Ecuador, esto se debe a la distribución de placas tectónicas presentes a lo largo del continente americano, es decir que Colombia no está exento de tener una gran actividad sísmica.

Colombia se encuentra en la intersección de tres placas tectónicas, la placa Nazca, Suramericana y la Placa del Caribe además de encontrarse en una de las zonas con más actividad sísmica como el cinturón de fuego del pacífico, en cuyos procesos se evidencia una transmisión de esfuerzos

entre placas debido a la dinámica terrestre, por lo que no es imposible pensar que estos esfuerzos puedan ocasionar sismos (Terremotos) en algunas zonas del país.

Debido a lo anterior, en los últimos años se ha aumentado la preocupación estatal por un posible evento sísmico en las diversas ciudades, ya que por experiencias pasadas, la falta de gestión y ausencia de conocimiento acerca de los tipos de mitigación a este tipo de amenazas, eventos ocurridos como en armero en 1985 que generó una gran cantidad de pérdidas humanas, por ello es necesario implementar procesos de gestión con el fin de mitigar la afectación producida por un sismo de diseño (máximo) en las diversas zonas de Colombia, especialmente en el caso de Bogotá, buscando minimizar los daños provocados por ejemplo: derrumbes o hundimientos (Licuefacción) y que se pueda a corto o mediano plazo intervenir una emergencia a esta escala (Planes de amenaza – Impuesto).

Por esta razón la idea general de este proyecto de investigación es el desarrollo y evaluación del riesgo sísmico en Bogotá a partir de la implementación de espectros teóricos que ayuden a brindar herramientas para el diseño de planes de evacuación, diseño de edificaciones que presentan una mayor amenaza debido a sus características físicas (Localización, suelos, vulnerabilidad), sociales (en caso de emergencia) entre otros.

1.6. ANTECEDENTES DE ESTUDIOS SÍSMICOS

Durante la historia colombiana se ha evidenciado la existencia de movimientos superficiales de tierra; las cuales han derivado grandes cambios sobre el desarrollo del territorio, como lo son la superposición de placas y formación de estructuras montañosas y han generado alertas sobre la falta de planeación y de ordenamiento.

Un ejemplo de esa historia la podemos constatar en el documento más antiguo el cual registró de manera sencilla los fenómenos naturales y sus consecuencias en Colombia, llamada El diario de Don Luis Vargas Jurado (La RED, 1997), este diario registró durante el periodo colonial un sismo el 8 de octubre 1743 donde hubo daños notables sobre Bogotá el oriente del país. Después en los registros se evidenció en 1785 uno de los sismos más severos sobre Bogotá y parte de Popayán.

Sismos más representativos en Bogotá D.C (El espectador, 2009): En Bogotá se ha presentado una serie de movimientos de la tierra con una intensidad intermedia que ha generado la evacuación de los ciudadanos sin daños materiales o humanos, el más reciente fue en 2016. Sin embargo, en Bogotá se han registrado 7 sismos con intensidad considerable en los años 1743, 1785, 1827, 1917, 1928 y 1967. Donde describiremos los 3 sismos que presentaron con daños representativos.

- 1785: El 12 de julio de este año se presentó un terremoto, los daños fueron considerables en la mayoría de los edificios de la ciudad, conventos y torres de iglesias, era una alarma importante para el manejo de estas emergencias. La intensidad fue de 6 en la escala de Richter y una intensidad de VIII en la escala de Mercalli con epicentro el Páramo de Chingaza.
- 1827: El 16 de noviembre de este año se presentó un movimiento fuerte, los daños ocasionados fueron contra algunas construcciones en Veracruz y Chapinero, la intensidad del movimiento fue de VIII en la escala de Mercalli, con epicentro en Timaná (Huila) en la documentación de

la época menciona que las malas condiciones de construcción y económicas aumentaron los daños del sismo.

- 1917: El 31 de agosto de 1917 se presentó en Bogotá un movimiento telúrico, en la época se calculaba una población aproximada de 100.000 habitantes. El sismo de intensidad VIII en la escala de Mercalli con epicentro el Páramo de Sumapaz, provocó que salieran de la ciudad alrededor de 30.000 personas, además destruyó la mayoría de Villavicencio. En Bogotá dejó un saldo de 6 muertos, 400 casas destruidas y algunos edificios averiados.

Todos estos registros sin tener en cuenta 10 sismos presuntamente ocurridos en la ciudad de Bogotá, pero no documentados o demostrables, son parte fundamental de la sismología, donde da sustento al presente estudio y a la necesidad de la atención y prevención de esta clase de emergencias en el territorio capitalino. Ahora es necesario entrelazar la historia de los movimientos telúricos y la obligación de estudios que analicen esta actividad, es por ello que se mostrará la historia de la sismología y algunos avances que se hacen para un mejor conocimiento sobre esta temática.

El primer estudio general de amenaza sísmica de Colombia fue hecho en 1984 y fue la base del primer Código Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes (Decreto 1400 de 1984), donde también se implementó un banco histórico. Se han desarrollado estudios sobre amenaza sísmica ya sea a nivel local o regional, además, se han concentrado investigaciones en aquellas zonas que tienen una alta amenaza sísmica o su población es representativa, cabe resaltar aquellos pioneros en Colombia en los siglos XVIII y XIX en la cual sobresale la obra del Padre Jesús Emilio Ramírez, en particular su Historia de los Terremotos en Colombia (Baquero, 2003).

Además se puede hablar de los realizados por INGEOMINAS, hoy (SGC) Servicio Geológico Colombiano y por la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (ACIS), el SGC mediante actividades generó la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC), la cual surgió de la necesidad de contar con un instrumento moderno y confiable para suministrar información precisa en relación con la sismicidad del país, dónde empieza con la selección de estaciones remotas, formatos de transmisión de datos y forma de procesamiento, generan la recepción de datos satelital en la sede principal en Bogotá (SGC, 2011), una de las bases de estudios pioneras fue el primer estudio general de amenaza sísmica de Colombia, dicho estudio sirvió de base para definir los parámetros para diseño sismo resistente para edificaciones, establecidos en las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente en 1998, fue el resultado de los estudios de amenaza sísmica que fue necesario actualizar para la creación de la Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente en 2010 (Salgado, 2010).

De igual forma, se han desarrollado estudios geológicos y geotectónicos de los suelos del área, entre los que cabe resaltar el realizado en el año 2010 por el Servicio Geográfico Colombiano en conjunto con la Universidad Nacional de Colombia. En dicho estudio se realizó un análisis sobre las “posibles implicaciones de las condiciones locales en estaciones de referencia para la evaluación de la respuesta dinámica”, a partir de investigaciones con datos de sismos previos en Bogotá que es percibido por medio de la estación ubicada en El Rosal. En el mismo año la Alcaldía Mayor de Bogotá llevó a cabo la “zonificación de la respuesta sísmica de Bogotá para el diseño sismo-resistente de edificaciones”, donde se llevaron a cabo estudios geotécnicos y mapas de

microzonificación sísmica con espectros de respuesta obtenidos en diferentes puntos de la ciudad a partir de sondeos, para establecer clases de estabilidad de suelo y amenazas (SGC, 2010).

1.7. ALCANCE DEL PROYECTO

El propósito fundamental del presente proyecto es exponer la conceptualización teórica del método probabilístico zonificado para la caracterización de la peligrosidad en Bogotá D.C, el cual se manifiesta como una alternativa para la actualización de la norma sismo resistente colombiana (NSR 10), además, como un elemento para el desarrollo de planes de gestión de riesgo sísmico en la ciudad. El cual es aplicable como base para una metodología en el campo de gestión de riesgo en el país y busca incentivar la aplicación de esta rama dentro del entorno de la carrera de Ingeniería Catastral y Geodesia en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Para el desarrollo de esta metodología se implementó información del catálogo sísmico experto y catálogo de sismos históricos del país brindados por el Servicio Geológico Colombiano (SGC), además de contar con información de mapas base y referencia de distintas fuentes como SIGOT, IDECA entre otros, por otro lado se implementaron zonas sismo-genéticas brindadas por el GEM (Global Earthquake Model) y OPENQUAKE los cuales desarrollaron un estudio de riesgo sísmico para Latinoamérica denominado SARA Project (The South America Risk Assessment) en el cual manejan este tipo de información. Con lo anterior poder desarrollar a través de la integral de peligrosidad, los espectros de respuesta sísmica, las curvas de peligrosidad y mapas de peligrosidad sísmica según la tipología de suelos brindada por la NEHRP para el desarrollo de los objetivos planteados en el proyecto de investigación.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. EVENTOS SÍSMICOS

2.1.1. Mecanismos Focales y Tipos de Fallas

Es importante identificar cuáles son los parámetros de una falla que permiten su clasificación, entre ellas encontramos (*ver ilustración 1*):

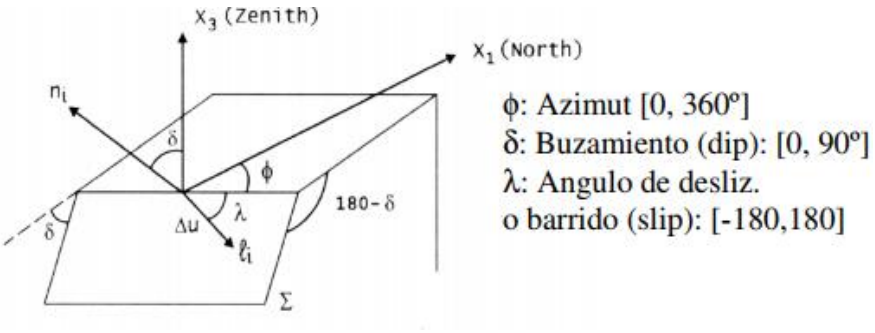


Ilustración 1: Parámetros focales de la falla.
Fuente: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/19942/15/Tema%204.pdf

- Dimensiones del plano de falla: Longitud de la falla L, Anchura de la falla D, falla rectangular S=L.D.
- Traza de la falla: intersección del plano de falla con el plano horizontal.
- Azimut de la falla ($0° \leq \varphi \leq 360°$).
- Disloque Δu.
- Ángulo de desliz (λ) en dirección de su disloque ($-180° \leq \lambda \leq 180°$).

Con lo anterior podemos clasificar las Falla en 4 tipos (*ver ilustración 2*):

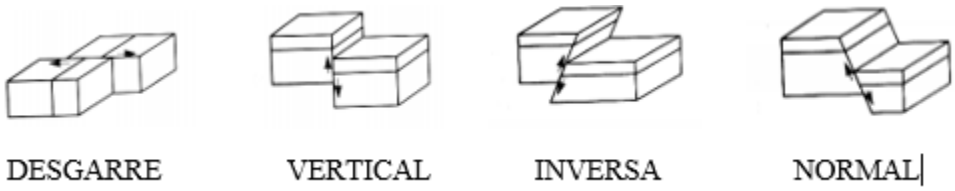


Ilustración 2: Tipos de fallas
Fuente: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/19942/15/Tema%204.pdf

Sin embargo, existe otro tipo de clasificación según el comportamiento de la falla (*ver ilustración 2*).

- Fallas Normales: $0° < \delta < 90°$ con un valor de desplazamiento λ=-90°.
- Fallas inversas: $0° < \delta < 90°$ con un valor de desplazamiento λ= 90°.
- Fallas horizontales o de desgarre: Son aquellas en las que el factor de buzamiento δ está cerca a los 90°, dependiendo del movimiento relativo de los bloques, la falla suele ser destral (derecha) λ= 180° o siniestral (izquierda) λ= 0°.

- Fallas de gravedad o verticales: cuando $\delta = 90°$y $\lambda = \pm 90°$.
- Fallas mixtas u oblicuas: estas se dan cuando $\lambda \neq 0°$, 180° o ±90°, suelen ser resultado de diversos tipos de fallas.

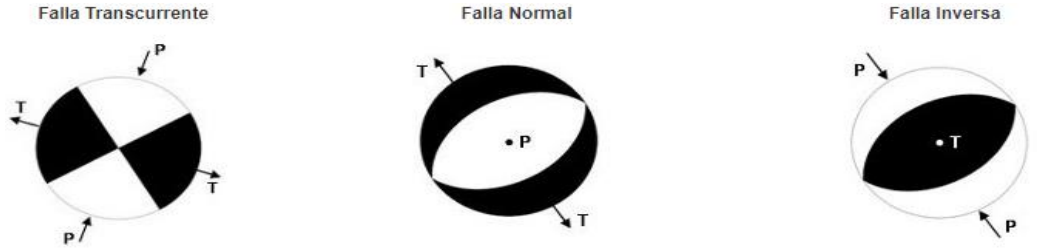


Ilustración 3: Mecanismos focales de los principales tipos de fallas
Fuente: http://www.funvisis.gob.ve/info_mecanismos.php

El mecanismo focal hace referencia a una representación gráfica en 2D de las posibles soluciones de la ruptura original de un sismo, además que colabora con la representación asociada a la transferencia de los esfuerzos tectónicos en el emplazamiento (Annemarie Christophersen, 2014). En la *ilustración 3* se diferencia la representación de tensiones en la superficie terrestre, en el cual P: Dilatación y T: Compresión. La solución de los mecanismos focales se realiza a través del análisis de la polaridad y las formas de las ondas generadas por las primeras ondas del terremoto registradas en un sismógrafo, en los cuales es posible identificar el tiempo de origen, profundidad focal, momento sísmico, magnitud y orientación espacial de dichos componentes, en el cual gráficamente se busca distribuir dichos registros con relación al epicentro con una plantilla circular, de esta forma según los esfuerzos presentados se realiza su distribución; los tres factores importantes asociados al desarrollo de mecanismos focales son:

- Cobertura de las estaciones sismológicas existentes.
- Magnitud de los eventos sísmicos.
- Lecturas de compresión y dilatación adecuadas (relación señal/ruido).

2.1.2. Transferencia de Esfuerzos de Coulomb

La transferencia de esfuerzos de coulomb hace referencia a un proceso geológico relacionado con la sismicidad de un emplazamiento, debido a los cambios de estrés generados por los eventos de deformaciones locales al liberar energía. Esto quiere decir que la energía que libera un sismo no se disipa, sino que también puede ocurrir que esta se acumule en las diferentes secciones de la falla, ocasionando de esta manera la carga y concentración de energía promoviendo temblores posteriores, algunos ejemplos de lo anterior es el desarrollo de modelos de predicción de sismos que se utilizan para evaluar los riesgos relacionados con la actividad física.

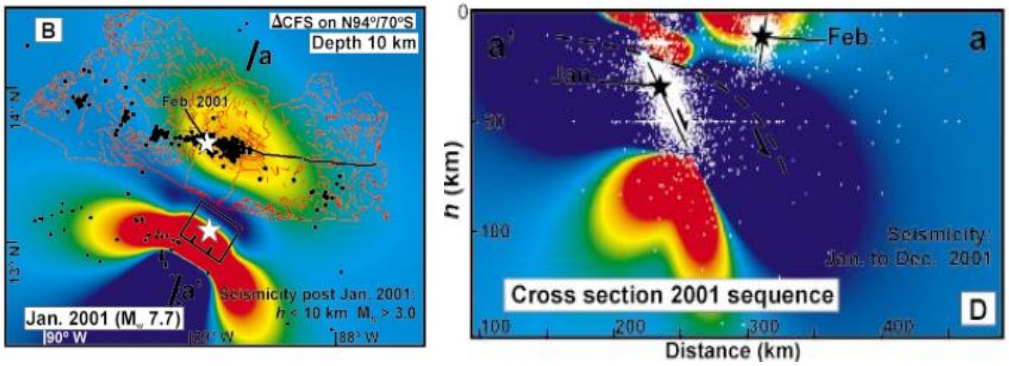


Ilustración 4: Ejemplificación Transferencia de esfuerzos de Coulomb
Fuente: Geological Society of America, 2004

Para poder desarrollar los esfuerzos de Coulomb provocados por el movimiento o liberación de energía de una falla, es necesario conocer cómo fue el movimiento de la primera falla y cuál es la orientación de la falla a analizar, ya que se deben calcular la variación de los esfuerzos y como estos se clasifican; es decir si se presenta una variación positiva del esfuerzo de coulomb la falla se verá aproximada a su ruptura, mientras si es negativa será alejada. Un ejemplo de ello lo podemos visualizar en la *Ilustración 4*, en donde las superficies rojas hacen referencia a superficies con variaciones positivas es decir que las fallas que se encuentren en dicha zona pueden absorber dicha energía pudiendo desencadenar o fomentar el desarrollo de un sismo, mientras que las zonas azules hacen referencia a la relajación del terreno ya que se ha liberado las tensiones que estas generaban.

2.1.3. Teoría del Rebote Elástico

La teoría del rebote elástico nace debido al resultado que dejó el terremoto de San Francisco 1906 como medio de explicar la forma en que se libera la energía al ocurrir un terremoto. En principio esta teoría se centra en la acumulación de la energía sísmica a través de la deformación de la tierra, tal y como se muestra en la *Ilustración 5* la superficie de falla se deforma generando una concentración de tensiones en los límites de las placas corticales, en el cual la resistencia del material colapsa causando la ruptura de la capa rocosa desencadenando de esta forma el sismo. En algunas ocasiones solamente hace falta la existencia de un pequeño esfuerzo para desencadenar la liberación de la energía, cabe resaltar que esta se puede dar en pequeños fraccionamientos que se pueden producir en diferentes periodos de tiempo y con magnitudes variables (Manual de geología para ingenieros, 2010).

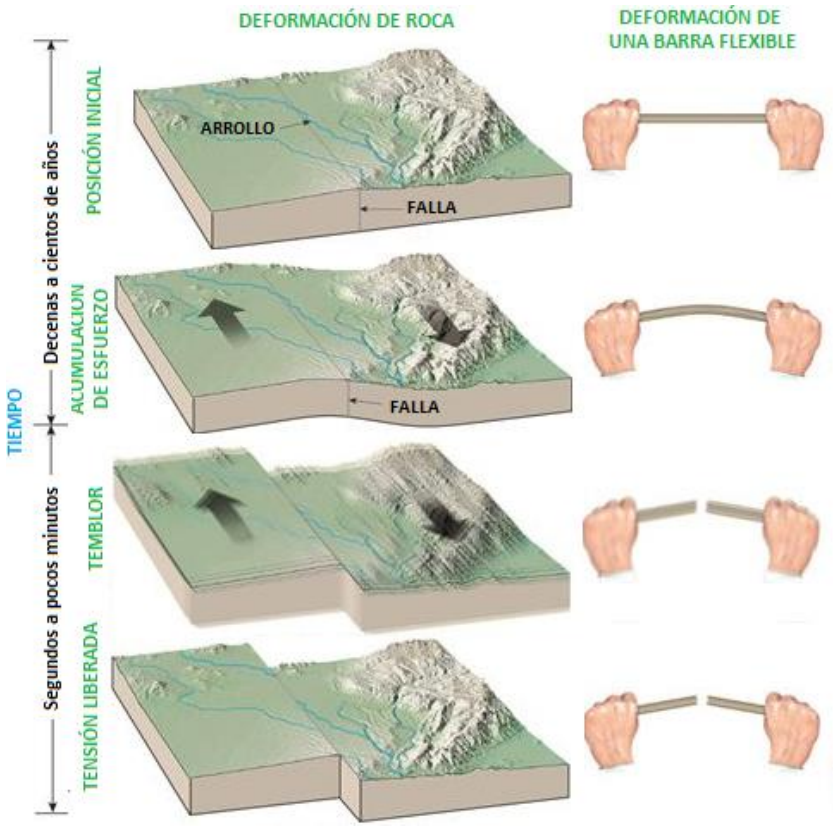


Ilustración 5: Deformación terrestre
Fuente: Adaptación propia a partir de imagen de Pearson Prentice Hall, Inc., 2012

2.1.4. Norma Sismo Resistente Colombiana (NSR 10)

Las estructuras sismo resistentes hacen referencia a un modelo de construcción, el cual tiene la finalidad de disminuir la vulnerabilidad presente en la zona, se basa en la normativa que prevé el tipo de diseño requerido para las edificaciones según la vida útil y la resistencia de las cargas sísmicas. Como es bien conocido la implementación y desarrollo de una norma se basa en algún proceso descriptivo en el cual se analiza la necesidad de intervenir las construcciones.

La norma sismo resistente colombiana surge a partir del primer estudio de amenaza sísmica realizado en Colombia, la cual fue actualizada el año 1996 por parte del comité AIS-300 con el cual se desarrolló las Norma Colombianas de diseño y construcción sismo resistente (Salgado, 2010). De igual manera es válido expresar que para la determinación de la NSR10 fue necesario desarrollar una actualización del estudio de amenaza sísmica, esto definitivamente como plan para la evaluación y prevención de un posible sismo en el país, además de contribuir a la disminución de la vulnerabilidad de las edificaciones de la ciudad.

Ahora bien, respecto al contenido general de la norma identificamos la existencia de 11 títulos de la norma A-K, de los cuales uno de los principales capítulos que aportará al presente proyecto hace referencia al Título A - Requisitos generales de diseño y construcción sismo resistente, en el cual se plantean las disposiciones generales para el desarrollo y cálculo de la peligrosidad sísmica, el

cual sirve como base fundamental para el desarrollo de proyectos relacionados con las normas constructivas de las edificaciones.

2.1.5. Escalas Sismológicas

Escalas de Magnitud

La magnitud hace referencia a un valor único del sismo el cual se encuentra relacionado directamente con la cantidad de energía liberada en un sismo, este se encuentra limitado por algunas variables como: la resistencia de la roca en la corteza, y la longitud de ruptura probable de la falla, hay que tener en cuenta también las diferentes formas de medir dicha distancia de ruptura ya que estas se pueden hacer de forma puntual o por longitud de la falla quebrada.

Escalas de Intensidad

Cuando hablamos de las escalas de intensidad, directamente debemos relacionarlo con el nivel de daño que se puede presentar tanto en las construcciones y en la percepción que tengan los seres humanos ante un evento sísmico (*ver tabla 1*). Para esto es posible identificar dos tipos de escala la escala de Mercalli y la escala de Mercalli modificada, a la cual se le añadieron unos pequeños cambios respecto a la original (Wood and Neumann, 1931).

Tabla 1: Escala de Mercalli

TIPO	GRADO	DESCRIPCIÓN
I	Muy débil	Lo advierten muy pocas personas.
II	Débil	Lo perciben algunas personas en reposo.
III	Leve	Se percibe en el interior de edificios y casa.
IV	Moderado	Los objetos colgados oscilan levemente.
V	Poco Fuerte	Sentido casi por todas las personas, incluye el exterior de las viviendas.
VI	Fuerte	Lo perciben todas las personas.
VII	Muy Fuerte	Presenta dificultad para mantenerse de pie.
VIII	Destructivo	Se hace difícil e inseguro el manejo de vehículos.
IX	Ruinoso	Se produce una inquietud general.
X	Desastroso	Se destruyen o agrietan grandes partes de las estructuras de albañilería.
XI	Muy desastroso	Muy pocas estructuras quedan en pie.
XII	Catastrófico	El daño es casi total, se desplazan grandes masas de roca.

Fuente: Wood and Neumann, 1931

2.2. RIESGO

Cuando hablamos de la necesidad de desarrollar planes de gestión y mitigación del riesgo en cualquier zona del mundo, es necesario en primera instancia definir cada uno de los procesos que pueden llegar a afectar un emplazamiento o zona particular. De allí emerge la importancia de

conocer e identificar cada una de las características físicas de la zona y cómo pueden repercutir negativamente en el entorno, ocasionando como tal un daño. Por lo anterior es importante conocer el riesgo al cual se está enfrentando. En una sociedad existe una gran variedad de elementos, procesos o fenómenos que pueden ser considerados un riesgo para un tipo particular de población, es por ello que optamos por definir el riesgo contextualizado en zona de estudio. Riesgo se define como la combinación de probabilidad que se produzca un evento que ocasione consecuencias negativas (CIIFEN, 2016), esto quiere decir que el riesgo se encuentra asociado a la probabilidad de que se desarrollen consecuencias perjudiciales para un elemento importante en conjunto.

Es decir que para que exista un riesgo deben existir algunos elementos de valor que sean afectados, un ejemplo bastante repetitivo se encuentra asociado a ¿Qué sucedería si ocurriera un evento sísmico de magnitud local 8 en un desierto inhabitado?, en respuesta a esto pensaríamos en primera medida que ese riesgo solamente existiría si en el desierto hubiera algún elemento de valor, así que para este caso se evidencia que no existe un riesgo. También podría hacer referencia que dicho desierto está asociado a un ecosistema valioso a la sociedad, en ese caso se buscaría proteger e intentar solventar el riesgo; en este caso sí interviene el riesgo, ya que se alteró una zona que tenía una importancia dentro del contexto social.

Por otro lado, hay que reconocer que una de las principales variaciones que presentaremos en este proyecto es que el enfoque del riesgo se centra en el Riesgo sísmico, esto quiere decir que se encuentra arraigado directamente con la posibilidad de que exista un daño determinado a causa del fenómeno natural del evento sismo (Terremotos), a continuación, se evidencia la definición convencional del riesgo, esto con el fin de poder definir cada una de las variables que lo determinan.

$$\textbf{RIESGO} = \text{Peligrosidad} * \text{Vulnerabilidad} * \text{Exposición} * \text{Costos} \quad (1)$$

Centrando a las características del presente proyecto, es necesario expresar que el riesgo sísmico se encuentra asociado con el número de perdida que se generan en un emplazamiento especificado en función de un movimiento esperado en t años, de esta manera a continuación procedemos a explicar cada una de las variables que alteran el riesgo enfocado en la sismología.

2.2.1. Peligrosidad

La peligrosidad hace referencia a la existencia de un fenómeno natural que afecta un determinado espacio, es decir reconocimiento de un evento que puede llegar a ocurrir en un espacio particular. En este caso se encuentra asociado a un movimiento fuerte al cual se le asocia una probabilidad de que suceda (Instituto Geológico y Minero de España, 2015).

2.2.2. Vulnerabilidad

Este factor se encuentra ligado con la capacidad de daño que puede presentar una población debido a la ocurrencia de un movimiento fuerte. Es decir que es necesario evaluar qué elementos del contexto económico, constructivo y social puede llegar a presentar un daño debido a el fenómeno físico analizado. Para el caso de la vulnerabilidad, es posible identificar tres tipos, los cuales se

pueden analizar dependiendo del nivel de detalle con el que consideremos necesario manejarlo, estas son:

1. Vulnerabilidad estructural
2. Vulnerabilidad social
3. Vulnerabilidad sistémica

Mediante las funciones de vulnerabilidad es posible obtener de una manera continua, diferentes niveles de daño para diferentes intensidades (aceleración espectral en este caso) de los elementos expuestos (ERN Colombia, 2006).

2.2.3. Exposición

Hace referencia a los elementos que potencialmente llegue a afectar el peligro, para el proyecto hace referencia a la cantidad de personas y sectores de la ciudad que se verían afectados directamente con el fenómeno físico en el caso de que ocurriese. Usualmente para poder determinar el nivel de exposición de un sector en particular es necesario definir las características de la zona, como:

1. Distribución geográfica.
2. Distribución temporal.

Exposición de Edificaciones

Para analizar la exposición de edificaciones es significativo reconocer los factores de construcción y la normatividad establecida localmente para la gestión de riesgos. Para lo anterior es necesario consultar sobre las estructuras, sus materiales de construcción, número de pisos, capacidad portante del suelo, área construida, vetustez, entre otros.

Además, es necesario reconocer la capacidad portante por medio de una clasificación del suelo, por ejemplo, podemos identificar la exposición de las edificaciones por anotaciones de efectos en estas construcciones durante sismos históricos en Bogotá. Podemos identificar sobre el parque inmobiliario de Bogotá durante el sismo ocurrido el 9 de febrero de 1967 que las casas con mala estructura y elaborados con materiales reciclables fueron destruidos, los edificios bien construidos se presentaron daños moderados: como grietas largas y caídas de revestimiento en gran proporción, los edificios más vulnerables tenían grandes grietas y semi-destrucción de muros (SGC, 2001).

Exposición de Población

El número de habitantes expuestas al fenómeno es un dato necesario para estimar las víctimas mortales y heridos asociados a los escenarios de riesgo sísmico. En cifras totales, en 2017 la ciudad de Bogotá tiene 8.080.734 de habitantes, según el estudio de Proyecciones municipales por área del Departamento Administrativo Nacional de Estadística de Colombia.

También cabe identificar que mediante las mismas proyecciones del Departamento Administrativo Nacional de Estadística de Colombia (DANE), que para el 2020 que se presente 8.380.801 habitantes, es decir que en 3 años se espera más de 300.000 habitantes más, y se espera que pase

de 4.663 hogares en el 2017 a 4.897 hogares, es decir se espera una expansión y una densificación urbana.

2.2.4. Costos

Esta variable se centra netamente en los costos de reposición a nuevo, asociados a un daño particular sobre los elementos expuestos, en este caso en estos elementos están involucrados las construcciones o edificaciones (análisis de estructura), los costes relacionados con la atención de heridos y sedes enfocadas a la atención a causa de un daño sísmico, zonas enfocadas a la atención de primeros auxilios para damnificados, alimentación entre otras características.

Según el tipo de metodología implementada, es posible definir aquellas clasificaciones para la estimación del daño, los cuales generalmente se derivan en Nulo, Leve, Moderado, Extenso o completo el cual depende del nivel de colapso y daños en las estructuras (Milutinovic y Trendafiloski 2003), por otro lado la cantidad de personas se puede manejar a partir del método Coburn and Spence 2002, en el cual el daño se caracteriza solamente por aquellas estructuras que colapsan en su totalidad, la densidad de la población y la intensidad del movimiento; y que se basa en las cualidades económicas y valores de costos asociados a la reparación de las estructuras y las ayudas para todos los damnificados, para ello es importante remontarnos a la siguiente expresión:

$$Pu = Valor\ Catastral/Superficie\ Promedio\ de\ la\ vivienda[\$/m2] \quad (2)$$

Donde Pu = Precio unitario que se ha implementado para generar un sondeo general de costos de reparación para las viviendas, sin embargo, es necesario reconsiderar la idea, ya que el valor catastral no representa realmente el valor comercial de la vivienda ya que este es utilizado solamente como base para la cuantificación del impuesto predial unificado, y su determinación depende del valor comercial operado por un factor CONFIS, así pues, estamos sobrevalorando el valor actual de los materiales de construcción y como se asocia este valor al suelo.

$$CR = ST.PC.PU \quad (3)$$

En donde CR = Costo de reparación, ST = Superficie total construida, PC = Probabilidad de daño y PU = Precio unitario. Así pues, en la expresión planteada anteriormente se denomina el valor asociado al costo de reposición a nuevo con el producto de la superficie construida, la probabilidad de daño completo a la construcción y el precio unitario por tipo de daño. Finalmente se tendrá en cuenta los costos asociados a los daños extensos, moderados y leves que presentan un porcentaje en su costo de reconstrucción según (Vacareanu et al, 2004):

- Costo de reparación de daño leve: 2% del CR.
- Costo de reparación del daño moderado: 10% CR.
- Costo de reparación del daño extenso: 50% CR.

2.3. CARACTERIZACIÓN DE LA PELIGROSIDAD

La peligrosidad sísmica se define como la diversificación de cuatro parámetros, los cuales asocian la probabilidad que un valor parámetro del movimiento sea excedido por otro en un emplazamiento específico durante un tiempo determinado, actualmente una de las definiciones más aceptadas

define la peligrosidad (H) como una función de probabilidad en la que un parámetro de peligrosidad por aceleración sísmica x, en un emplazamiento o sitio, mediante la función (UNDRO, 1980).

$$H = P[x(s) \geq x_0; t] \quad (4)$$

El valor de H se asocia con respecto a la probabilidad P de que se exceda un valor umbral x0 del parámetro en función del emplazamiento en un periodo de tiempo t, según el caso es posible que este valor se pueda dar según diferentes tipos de escala para su determinación, entre ellas podemos encontrar las escalas macro sísmicas o los valores de PGD (Peak ground Displacement), PGV (Peak ground velocity) y PGA (Peak ground acceleration), el valor a utilizar dependerá de las condiciones para el desarrollo de la evaluación sísmica esperada.

De esta manera podemos definir que las características asociadas al riesgo no depende únicamente de la caracterización del movimiento esperado en Bogotá (Peligrosidad), sino que también tiene en cuenta la información referente a la cantidad de edificios (Exposición) con una cierta vulnerabilidad especificada refiriéndose a los daños que el sismo podría generar en las mismas, así en el caso de asociar un movimiento de peligrosidad alta con una vulnerabilidad baja estaríamos diciendo que este lugar tendría un riesgo bajo respecto a sus características físicas (diseño sismo resistente). Esto quiere decir:

- La peligrosidad es inherente del fenómeno y no se puede controlar ni reducir
- La vulnerabilidad en cambio se puede reducir

Como se mencionó anteriormente el riesgo se encuentra asociado a la probabilidad de que se presente la excedencia de un valor tratado en un emplazamiento y tiempo particular, para ello se encuentran aceptadas comúnmente dos metodologías para su determinación (Peligrosidad sísmica, 1999).

- Determinista: Esta metodología asume una hipótesis de estacionalidad de la sismicidad, en la cual se asume que los terremotos futuros se producirán de manera análoga a como lo hicieron en el pasado si se conocen las condiciones que los provocaron condicionado a valores límites superiores del movimiento, para ello es necesario definir los valores máximos que definen el sismo de control (Magnitud, Distancia radial, profundidad).
  Es decir que se espera un sismo de máximo VII según la determinación de los parámetros examinados.
- Probabilista: En esta metodología se deducen las relaciones de recurrencia de los fenómenos sísmicos de un emplazamiento a partir de la información existente de la misma, con los cuales es posible definir funciones de probabilidad para los parámetros buscados. Estos valores se asocian a una probabilidad anual de excedencia o un periodo de retorno.
  A diferencia del anterior a este se le asocia una probabilidad de excedencia al fenómeno caracterizado, por ejemplo, VII en Ml con una probabilidad anual de 0.002 o una tasa de retorno de 500 años (64%).

De esta forma es posible desarrollar la combinación de las características sísmicas de la zona y los modelos de atenuación, logrando de esta forma la integración del efecto fuente y la propagación

de la energía liberada hasta llegar al emplazamiento (GEM, 2015-2). El proceso para determinar la peligrosidad sísmica necesita la caracterización de tres factores principales: efecto fuente, efecto de propagación o trayectoria de la onda y el efecto local, estos se aplican generalmente cuando se realizan análisis de tipo regional o de microzonificación sísmica.

2.3.1. Efecto Fuente

El efecto fuente surge de la identificación de las condiciones sísmicas del medio o emplazamiento, se procede desarrollando una investigación sobre las fallas activas, luego se induce las leyes de recurrencia junto con los catálogos sísmicos en este caso brindado por el Servicio Geológico Colombiano SGC. Concluyendo con el desarrollo de modelos de recurrencia a los sismos potenciales de la zona (espacio-temporal de los sismos).

2.3.2. Ley de Recurrencia

La aplicación de esta ley define el máximo sismo potencial (determinista), además, desarrolla la estimación de los sismos por falla o por zona sismo-genética. También establecen la existencia de los sismos en una zona a través de las magnitudes presentadas en el lugar, es decir plantean las bases estadísticas para determinar cuál es la relación existente entre los sismos de una magnitud M Max con respecto a los presentes de magnitud M min (Gutenberg and Richter, 1994), los cuales a partir de su modelo plantean que la recurrencia de los sismos es Lineal en función de su Magnitud, esta ley denominada Ley Gutenberg Richter se plantea de la siguiente manera.

$$\log N = a - bM \tag{5}$$

La *ecuación 5* establece la frecuencia existente en los sismos de la zona, en donde el parámetro de mayor importancia es el valor a y b, que muestra la relación de proporción existente entre el número de sismos de una amplia magnitud con respecto a los de una magnitud pequeña en la zona de análisis, mientras que el valor de a en referencia a la ecuación de la recta, es decir cuál es la cantidad de sismos que presentan una magnitudes de cero, esto se puede asociar en definitiva a la tasa anual de terremotos que supera la magnitud de referencia.

Según lo mencionado anteriormente el momento de desarrollar la aplicación de las leyes de recurrencia para un conjunto de datos con un amplio rango temporal, es necesario determinar el valor de los parámetros a y b a partir de la determinación del modelo de regresión lineal asociado a este tipo de datos, claramente después de haber realizado el debido proceso de completitud, además, es necesario definir los extremos de magnitud para la cual la forma funcional de los datos se considerarán válida para la evaluación de la peligrosidad (M máx. y M min.) logrando definir de esta manera el patrón de la sismicidad presente en cada una de las zonas analizadas.

2.3.3. Efecto de Propagación

El efecto de propagación hace referencia al comportamiento de la onda en el trayecto desde la fuente hasta el emplazamiento analizado, donde la principal función de esta sección será determinar cuál es la variación de la energía y la amplitud de la onda que se moviliza entre los dos

puntos de estudios mencionados, además este efecto depende de las características geológicas de la zona de estudio porque los factores influyen en la atenuación de la energía, además, las características del sismo máximo potencial; donde se define como el mayor sismo que se puede llegar a presentar en una zona sismo-genética, que se determina a partir del análisis del catálogo sísmico, de esta manera es posible determinar cuál es el potencial sísmico de cada una de las zonas involucradas en el proceso.

$$A = f\ (M, R) \tag{6}$$

Donde A: atenuación, M: Magnitud y R: distancia radial, los anteriores son las variables principales que afectan a su atenuación, sin embargo más adelante hablaremos acerca de algunas características que son tomadas en cuenta en los modelos de atenuación del medio, cabe resaltar que este proceso se realiza suponiendo que en el emplazamiento a analizar se encuentra una superficie rocosa, por lo que no se tendrán en cuenta procesos amplificadores o agitaciones en el medio, esto se considerará al momento de realizar el efecto local.

En los factores que alteran la amplitud de la onda, hay que identificar dos factores esenciales como la anelasticidad del medio el cual trata de la capacidad del medio para absorber la energía liberada, que se cuantifica a través de modelizaciones de la corteza terrestre, la capa y la velocidad de transferencia de la propagación uniforme; por otro lado la expansión geométrica del frente de ondas, el cual se encuentra asociado directamente con la distancia (Radial), ya que a medida que aumenta la distancia la energía transmitida disminuye (Atenuación), de esta forma la metodología planteada (Belén Benito, 1999).

- Estimación independiente de la atenuación atribuida a cada uno de los factores mencionados, a través de modelos que representan la disipación de la energía en función de estos.
- Cálculo de la atenuación conjunta a través de leyes empíricas que relacionan los parámetros representativos del movimiento (Distancia epicentral y el parámetro de energía liberada del foco).

Una de las metodologías más comunes se refiere al planteamiento de modelos empíricos, los cuales hacen referencia al comportamiento de la atenuación en función de datos o información conocida, tal y como lo es la magnitud , la anelasticidad, la distancia entre otra variables, encontrando de esta manera la forma funcional y estimación de los coeficientes y porcentaje de influencia de cada variable en la regresión (Modelos econométricos), los cuales se definen como aceptables para cualquier fenómeno presentado en la zona (Kennet W. Campbell and Yousef Bozorgnia, 2013).

$$\ln A = C_1 + C_2\, M + \ C_3\, M^{C_4} + C_5 \ln\left(R + \ {C_6}^{C_7}\right) \tag{7}$$

En la *ecuación 7* es posible ejemplificar la determinación de un modelo de atenuación a través de la forma funcional asociada a los valores conocidos Atenuación = f (Magnitud, Distancia), cabe destacar que en muchas ocasiones estos modelos presentan un gran problema de incertidumbre debido al ajuste de los datos y su alcance para la evaluación.

2.3.4. Efecto Local

El efecto local hace referencia a las características topográficas, geológicas y tectónicas de la zona de estudio y cómo estas afectan las facultades físicas de la liberación de energía al momento de incidir (amplificación o de-amplificación) en la base rocosa. Esto quiere decir que es posible la existencia de estratos variables en la estructura del emplazamiento como sedimentos o características topográficas que pueden influir en las condiciones locales, algunas de estas son:

- Geología superficial: La cual se centra en las capas existentes sobre la base rocosa que oscila al recibir el movimiento.
- Topografía: Existencia de interferencias constructivas o destructivas entre las ondas incidentes refractadas al generarse un cambio de medio.

Estas manifestaciones se suelen expresar como un factor aplicado al valor de la aceleración pico (PGA), y la presencia de un factor que representa la traslación del movimiento.

$$PGAs = PGAr \,.A\, PGA \tag{8}$$

Donde PGAs = Aceleración pico espectral, PGAr = Aceleración espectral referencia, A = Factor de amplificación, PGA = Aceleración pico. El razonamiento básico de este fenómeno se asocia directamente con el tipo de suelo presente en la zona, y se dice que los suelos blandos presentan un periodo de amplificación elevado, el cual ocasiona una mayor cantidad de daño a los edificios y viviendas, además es posible asociar que este fenómeno no presenta linealidad, por lo que puede llegar a ocasionar mayores amplitudes sobre movimientos débiles que sobre los movimientos fuertes, ya que en algunos casos los suelos blandos y ubicados en altiplanos presentan un proceso de contención de las zonas, lo que agrava el daño presente en la zona de análisis.

Ahora bien, para implementar este tipo de procesos es necesario utilizar ejemplificaciones de la clasificación del suelo según las diferentes normatividades existentes, se divide en función de la velocidad de cizalla a 30 metros de profundidad y las características físicas del mismo, por ejemplo, roca o depósito superficial, entre algunas normativas que se pueden llegar a tomar en cuenta son:

- Normativa Americana - NEHRP (FEM, 2003).
- Normativa europea - Eurocode (Eurocode, 2008).
- Normativa Colombiana - NSR 10 (NSR 10, 1997).

En los que es posible identificar la clasificación de los diferentes tipos de suelo para cada zona en la que se encuentra reglamentada, además de que provee de las variables necesarias para desarrollar este análisis tal y como son: Vs30, Tipo, descripción Constante de rigidez entre otros, que anexan un conjunto de tablas las que presentan los distintos factores de atenuación del suelo según la velocidad de cizalla en la profundidad de 30 metros y el tipo de suelo; aparte de esto es importante mencionar que la normativa colombiana presenta grandes parecidos en función de la norma americana y la normativa europea puesto que maneja los mismo tipos de suelo y factores de atenuación (*ver tabla 2*).

Tabla 2: Clasificaciones del suelo

TIPO DE PERFIL	DESCRIPCIÓN	DEFINICIÓN
A	Perfil de roca competente.	$\overline{V_s} \geq 1500\ m/s$
B	Perfil de rigidez media.	$1500\ m/s \geq \overline{V_s} \geq 760\ m/s$
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda cortante o.	$760\ m/s \geq \overline{V_s} \geq 360\ m/s$
	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios.	$\overline{N} \geq 50.o$ $\overline{s_u} \geq 100kPa\left(\approx \frac{1kg}{cm^3}\right)$
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda cortante o.	$360\ m/s \geq \overline{V_s} \geq 180\ m/s$
	Perfiles de los suelos rígidos que cumplan cualquiera de las condiciones.	$50 > \overline{N} \geq 15.o$ $100kPa\left(\approx \frac{1kg}{cm^3}\right) > \overline{s_u} \geq 50kPa\left(\approx \frac{1kg}{cm^3}\right)$
E	Perfil que cumplan el criterio de velocidad de la onda cortante o.	$180\ m/s > \overline{V_s}$
	Perfil que contiene un espesor total **H** mayor de 3 m de arcillas blandas.	$IP > 20$ $W \geq 40\%$ $50kPa\left(\approx \frac{1kg}{cm^3}\right) > \overline{s_u}$
F	Los perfiles de suelo tipo **F** requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista de acuerdo con el procedimiento de A.2.10. de la NSR - 10. Se contemplan las siguientes subclases: **F1 -** Suelos susceptible a la falla o colapso causando causado por la excitación sísmica, tales como: suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersos o débilmente cementados, etc. **F2 -** Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas **(H > 3 m** para una turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas**).** **F3 -** Arcillas de muy alta plasticidad **(H > 7.5 m** con índice de plasticidad **IP > 75).** **F4 -** Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda **(H > 36 m).**	

Fuente: NSR 10, 2010

También presenta los mismos factores de atenuación presentes en la norma americana, como se muestra en la *tabla 3*.

Tabla 3: Valores del factor de atenuación para las zonas de períodos cortos del espectro

TIPOS DE PERFIL	INTENSIDAD DE LOS MOVIMIENTOS SÍSMICOS				
	$A_a \leq 0.1$	$A_a = 0.2$	$A_a = 0.3$	$A_a = 0.4$	$A_a \geq 0.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1	1	1	1	1
C	1.2	1.2	1.1	1	1
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1

E	2.5	2.7	1.2	0.9	0.9
F	Para el perfil tipo F debe realizarse una investigación geotécnica particular para el lugar específico y debe llevarse a cabo un análisis de amplificación de onda de acuerdo con A.2.10 de la NRS – 10				

Fuente: NSR 10, 2010

Resonancia

Para entender el desarrollo de un fenómeno físico, es necesario establecer que son los modos de vibración, en donde se identifica los procesos de resonancia con respecto al periodo presente de la propagación de la onda sísmica. Por ejemplo, en un sistema oscilante podemos encontrar una cuerda atada en ambos extremos (guitarra) es posible identificar que si llegamos a una frecuencia de vibración que coincide con respecto a alguno de los modos de vibración de la cuerda se presenta un aumento en la amplitud del movimiento, a esto es lo que llamamos resonancia.

$$v = \sqrt{\frac{T}{M}} \tag{9}$$

Para el caso de la *ecuación 9*, donde T: tensión de la cuerda; M: es la densidad de la cuerda, existen varias definiciones para expresar los modos de vibración, donde se expresa las diversas formas en que un objeto puede vibrar, asociado a ondas estacionarias, generalmente cada uno de estos modos se pueden asociar directamente con el denominado **modo fundamental** el cual se define como la frecuencia mínima de vibración que es capaz de generar una onda estacionaria F0.

Por otro lado, es importante denotar que existen dos tipos de resonancia la resonancia constructiva y la resonancia destructiva, en donde los comportamientos respecto a la amplitud de la onda variarán según la frecuencia en la que oscila cada una de las ondas implicadas (Fernando López).

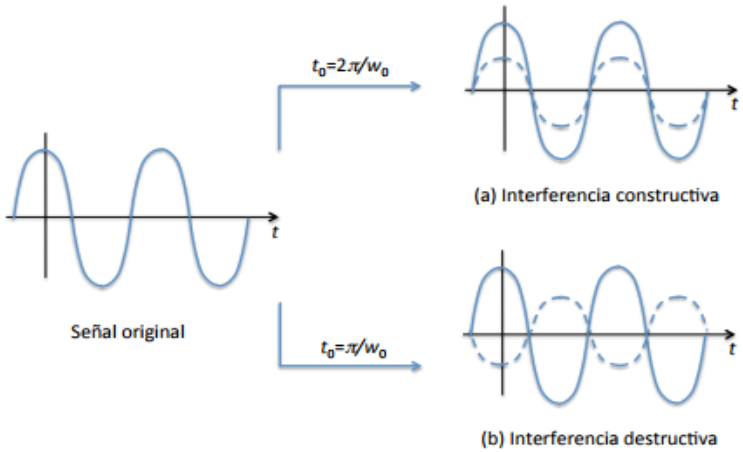


Ilustración 6: Resonancia constructiva y destructiva.
Fuente: NSR 10, 2010

La *ilustración 6* evidencia la interacción entre una onda (d1) que se encuentra desfasada con respecto a otra onda (d2) evidenciamos la presencia de interferencia destructiva ya que la amplitud de estas dos se anulan entre sí, sin embargo, en el caso de que exista un choque entre dos ondas con la misma frecuencia veremos que se presentara un proceso de interferencia constructiva o también llamada amplificación de la onda ya que la amplitud de dicha onda será el resultado de la suma de las dos originales.

Lo anterior se puede asociar directamente con los procesos de caracterización del efecto sitio, donde al generar los espectros de respuesta ante el evento sísmico se evidenciará la posibilidad que al chocar la onda sísmica con el medio se presenten fenómenos de amplificación o de-amplificación debido a la armonización del periodo fundamental de las construcciones con el del sismo, porque en estos casos las edificaciones se comportan como un elemento ondulatorio. Ocasionando de esta forma el incremento de la amenaza sísmica de la estructura física (construcciones).

2.4. PREDICCIÓN SÍSMICA

Es prioritario analizar las posibilidades que existen para desarrollar predicciones con gran exactitud de eventos sísmicos, lo cual científicamente por el momento es imposible, es decir que no es posible tener certeza sobre la fecha, hora y lugar de un evento sísmico, sin embargo, es posible identificar las características de la tierra que señala la existencia de una serie sismos en un periodo de tiempo, entre ellas encontramos:

Tabla 4: Capacidad de predicción

ESCALA	TIEMPO	APLICACIÓN
Corto	Horas	Evacuación
Medio	Días	Planes de emergencia y atención
Largo	Años	Planeación urbanística

Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta la *tabla 4*, el proyecto enfatiza la predicción a corto plazo, porque existen una gran cantidad de indicadores como: nivel de agua en los pozos, comportamiento de los animales, micro sismicidad, deformaciones del suelo, agrietamiento y filtración del agua, emanación de gases dentro de las rocas. Estos indicadores permiten revelar la ocurrencia de un fenómeno sísmico.

La predicción sísmica tiene intrínsecamente una problemática, que genera que los modelos de recurrencia conlleven un error, su cusa es la imposibilidad de enfatizar en su totalidad los elementos que atribuyen el comportamiento sísmico, además, los intervalos de recurrencia y las condiciones de la liberación de energía no son los mismos.

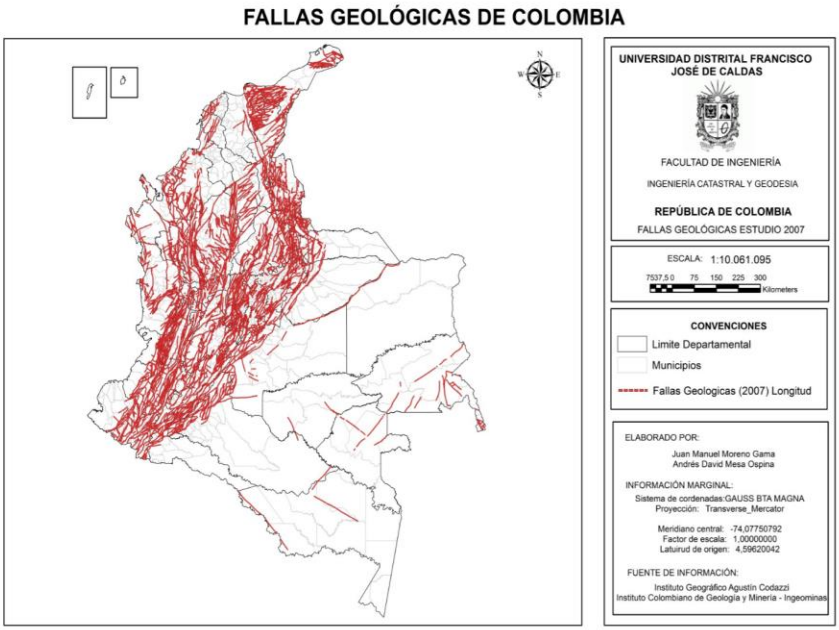
CAPÍTULO 3. DATOS, MODELO Y METODOLOGÍA

3.1. DATOS

3.1.1. Geología Estructural

De acuerdo al estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia (1996), y Normativa actual, Bogotá se encuentra en una zona de amenaza sísmica intermedia. Sin embargo, la proximidad a dos zonas de subducción asociadas a los límites de las placas de Nazca y Caribe con la placa de Sudamérica, unido a la presencia de un sistema de fallas locales, hacen de Bogotá D.C. una población expuesta a una importante amenaza sísmica.

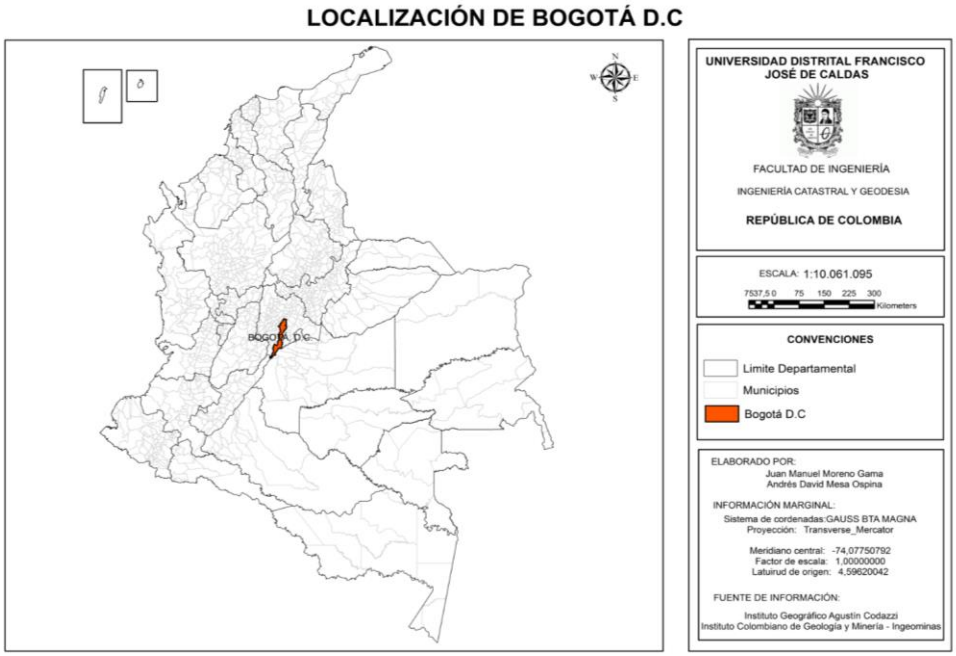
En Colombia se han identificado los siguientes tipos: falla cubierta, falla de rumbo dextral, falla de rumbo dextral cubierta, falla de rumbo sinestral, falla de rumbo sinestral cubierta, falla inferida, falla inversa o de cabalgamiento, falla inversa o de cabalgamiento cubierta, falla inversa o de cabalgamiento inferida y de Lineamiento, sin embargo esta tipológica se encuentra asociada a características en el comportamiento de la falla, por lo que el *mapa 1* presentan el total de fallas geológicas del país sin distinguir su tipología.



Mapa 1: Fallas geológicas de Colombia
Fuente: Elaboración propia

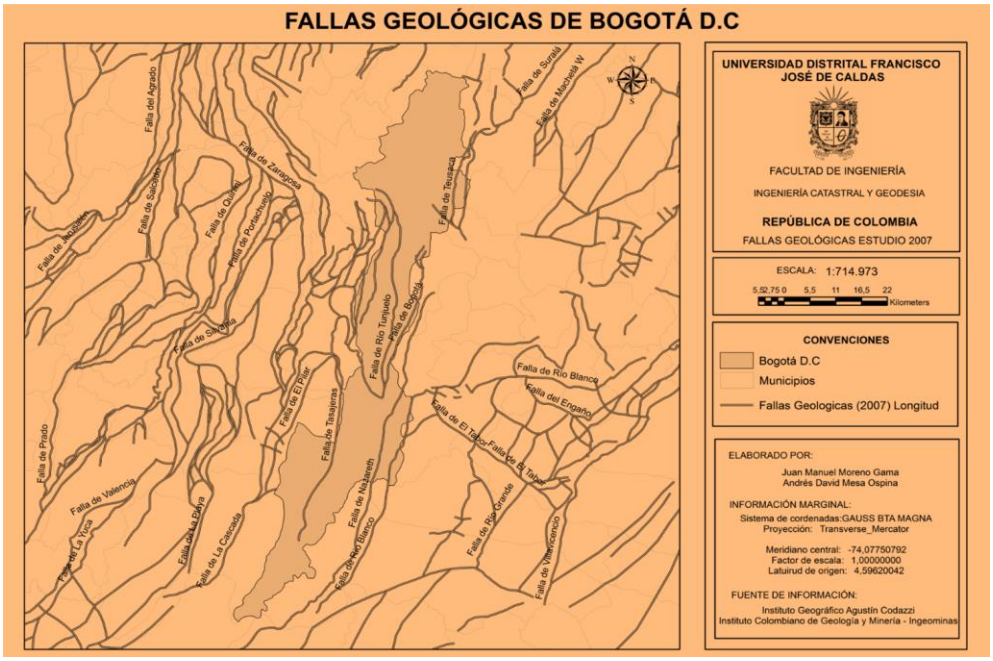
Bogotá es el distrito capital de Colombia (*ver mapa 2),* posee una división político administrativa de 20 localidades, está limitado por el norte con el municipio de Chía, con el Río Bogotá y los municipios de Mosquera y Funza en el costado occidental, por el costado oriental con los cerros orientales, los municipios de La Calera, Choachí y Ubaté y por el sur con el páramo de Sumapaz y Soacha, es el municipio más poblado del país, concentra el mayor producto interno bruto en el

país, tiene un clima frío húmedo. Bogotá posee depósitos de arcilla, material orgánico, limos y arenas.



Mapa 2: Localización de Bogotá en Colombia.
Fuente: Elaboración propia

En el *mapa 3* se evidencia la zona de emplazamiento y su área de influencia de 300 km, donde a nivel geotécnico se tiene la presencia de un sistema de fallas locales con su respectivo nombre de identificación, estas se definieron a través de procesos de monitoreo anuales de la corteza terrestre y paleosismicidad.



Mapa 3: Fallas geológicas zona de influencia Bogotá D.C.
Fuente: Elaboración propia

3.2. MODELAMIENTO

El proyecto se centra en la evaluación de la peligrosidad sísmica de Bogotá a partir del método probabilístico paramétrico, en el que es importante diversificar entre la función de distribución acumulada F(x) = P (X ≤ x) y la función de densidad de probabilidad f(x), las cuales permitirán desarrollar la base para la determinación de la peligrosidad.

Para definir el proceso a desarrollar, retomaremos la expresión original en la que se define la peligrosidad como una función de probabilidad.

$$H = P[x(s) \geq x_0; t] \tag{10}$$

Para su desarrollo será necesario especificar el nivel del movimiento x_0 al cual se le asocia la probabilidad de excedencia e indicar el periodo de la exposición t, además de tener en cuenta aquellos factores que influyen en su cálculo como la Magnitud, la distancia a la fuente y el número de desviaciones o ε el cual se asocia a la fiabilidad de la predicción.

Ahora bien, es necesario plantear la idea de que la sismicidad que afecta la zona se basa en un modelo de poisson, el movimiento fuerte esperado también se rige por dicho proceso, por lo que se desarrolla un análisis empírico al comparar la probabilidad de excedencia futura con el pasado.

$$P\ futuro\ [y \geq Y] \approx \lambda\ [y \geq Y] \tag{11}$$

Lo que indica que este tipo de distribución se puede expresar en función de un valor λ denominado tasa de retorno.

$$P\ [y \geq Y] = 1 - e^{-\lambda t} \tag{12}$$

Por lo que al definir el periodo de retorno o Tr se denomina como el inverso de P, por lo que:

$$Tr = \frac{1}{P\ excedencia} \approx \frac{1}{\lambda} \tag{13}$$

$$Así\ \ P\ [y \geq Y\ en\ t] = 1 - e^{-\frac{\lambda}{Tr}} \tag{14}$$

Por ejemplo, si se conoce que un sismo de t = 50 años de exposición presenta una probabilidad del 10% de excedencia, obtendremos una tasa de retorno de 475 años, lo que significa que para diseñar para el nivel de movimiento PGA con una probabilidad de excedencia en 50 años del 10% y con una Tr de 475 años, se referirá a una probabilidad de excedencia de aproximadamente 1/475 (Inversamente proporcional).

$$P[x(s) \geq x_0; t = 50\ años] = 0.1\ ; Tr = \frac{-50}{\ln 0.9} \approx 475\ años \tag{15}$$

Para la determinación de la peligrosidad, se debe especificar Y y t.
Ahora bien, según todo lo planteado anteriormente, la probabilidad de tener al menos una excedencia se basa a partir de la probabilidad de ocurrencia de un sismo en función de las tres variables principales de cálculo (magnitud, distancia, epsilón) (Belén Benito, 2008):

$$P_{anual}(y > Y) = P[y > Y|\, m, r, \varepsilon]\, P[m]P[r]P[\varepsilon] \quad (16)$$

$$= \int\int\int P[y > Y|\, m, r, \varepsilon]\, f_M[m] f_R[r] f_\varepsilon[\varepsilon]\, dm\, dr\, d\varepsilon \quad (17)$$

Ahora bien, al multiplicar por el número de sismos que ocurren en la zona al año $\lambda_{anual}(y > Y)$, encontraremos (Integral de peligrosidad):

$$P_{anual}(y > Y) = \lambda_{anual}(y > Y)\tau \int\int\int P[y > Y|\, m, r, \varepsilon]\, f_M[m] f_R[r] f_\varepsilon[\varepsilon]\, dm\, dr\, d\varepsilon \quad (18)$$

En donde y representa el parámetro del movimiento con el que se expresa la peligrosidad (PGA), τ expresa la tasa anual de ocurrencia de sismos, f_M la función de probabilidad de la magnitud dentro de cada fuente (efecto fuente--Surge a partir de la ley de recurrencia de la fuente), f_R se refiere a la función de densidad de probabilidad según la distancia (Efecto de atenuación del movimiento), f_ε se encuentra relacionada con la función de densidad de probabilidad asociada a la incertidumbre del movimiento, la cual se analiza mediante una distribución log-normal y funciona como el término asociado al número de desviaciones estándar que se consideran para la estimación de y.

Finalmente, el término $P\ [y > Y|\, m, r, \varepsilon]$ que es un valor que se asocia a si se produce o no una excedencia del nivel de movimiento, es decir solamente tomará dos valores 0, en el caso de que no se produzca una excedencia y 1 en caso contrario, la tasa especificada en el cálculo de la probabilidad anual se calcula mediante la siguiente expresión.

$$\tau = \frac{N}{T\ completitud} = \frac{10^{1-b\ m_{min}}}{T\ completitud} \quad (19)$$

Ahora bien, para finalizar con esta explicación procederemos a desarrollar una metodología general del procedimiento a desarrollar con los datos crudos investigados en las entidades de control de este tipo de fenómenos.

- Recopilación de la información general, datos crudos (base de datos), información sísmica y tectónica de la zona obtenida por el Servicio Geológico Colombiano.
- Preparación de la información de entrada para el cálculo de la peligrosidad del método zonificado.
- Cálculo de la peligrosidad: Cálculo del movimiento esperado para el emplazamiento en roca, la desagregación de la amenaza sísmica (sismo de mayor contribución), la estimación de la amenaza incluyendo el efecto local y la caracterización del movimiento con los resultados de la peligrosidad, a través de los espectros respuesta.

3.3. METODOLOGÍA

La metodología a tener en cuenta para el proyecto de investigación se divide en dos; una metodología general que se divide en tres etapas: el análisis del problema, el método probabilístico zonificado y el análisis de los resultados; y la otra que hace referencia a una complementación y profundización de la segunda etapa presentada en el método general (*ver ilustración 7*).

3.3.1. Análisis del Problema

La primera etapa corresponde al desarrollo analítico de la problemática a manejar, donde se evidencia el conjunto de datos fuente para la ejecución del proyecto como: los catálogos sísmicos, la tectónica de placas de la zona de estudio, la distribución de la fallas a lo largo del emplazamiento y el tipo de geología, lo cual permite desarrollar una identificación exploratoria de los posibles modelos a desarrollar, además, de obtener información crucial para la selección de los modelos de atenuación necesarios para la etapa número dos. Permitiendo de esta forma centrar el proyecto en una dirección: la caracterización de la peligrosidad sísmica, es decir el tipo de proceso a implementar para la correcta definición de la amenaza sísmica en la ciudad (probabilístico o estocástico) lo cual depende netamente del conjunto de información para la contextualización de la problemática.

Para el desarrollo de caracterización la metodología empieza por definir el área de influencia, según un ámbito estadístico de la muestra se especifica que los proyectos analizados cubren un área de 300 km del epicentro del emplazamiento, en esta área se define el conjunto de terremotos producidos en el pasado con la finalidad de predecir estadísticamente un futuro sismo, para ello se realiza un análisis de sismicidad sobre: los mapas de Isosistas, la sismicidad histórica y el catálogo sísmico, teniendo en cuenta que las herramientas de la antigüedad tenían un nivel de precisión instrumental baja lo que dificultaba su identificación, además que no se encuentran catalogados en su totalidad, por lo que se realiza un proceso de análisis de completitud, con la finalidad de garantizar que los sismos están relacionados estadísticamente; para estimar el efecto fuente es necesario cumplir con los siguientes requerimientos (Stepp, 1972).

- Homogeneización del parámetro de tamaño del sismo
- Corrección de la falta de completitud para la estimación de tasas
- Depuración de las réplicas y premonitores para la aplicación del método zonificado.

Tal y como se plantea en el artículo peligrosidad sísmica 1999, es importante una vez identificadas las fuentes sísmicas y los eventos desarrollados en una zona, generar un proceso de correlación de la información en las que se logre asociar dichos eventos con respecto a la tectónica del emplazamiento, esto principalmente para poder desarrollar e identificar las potenciales zonas sismo-genéticas que se implementarán para el proceso denominado caracterización de la peligrosidad sísmica, que hace referencia a:

- Identificación de las fallas y estructuras tectónicas principales (Importante incluir aquellas fallas que se consideren activas según el último movimiento presentado (Tamaño, orientación y tipo de falla), según este texto se menciona que este proceso es de vital importancia para el caso de planes enfocados a centrales radioactivas y almacenamiento de residuos radiactivos.
- Otros mecanismos para asociar la información que se refiere a mapas geológicos, estructurales, geomorfológicos entre otros.
- Algunos procesos que generalmente se implementan para el proceso de identificación de las fallas activas son la paleosismicidad, GPS, Catálogos.

3.3.2. Método Probabilístico Zonificado

Se centra en la ejecución del proceso de caracterización de la peligrosidad sísmica de la ciudad de Bogotá, a través de tres parámetros fundamentales, el catálogo sísmico del emplazamiento, las leyes de recurrencia y los modelos de atenuación con los cuales es posible desarrollar la integral de peligrosidad que permite el desarrollo de curvas de peligrosidad, mapas de peligrosidad sísmica y los espectros de respuesta el emplazamiento seleccionado.

El método que se implementó para desarrollo del proyecto es probabilístico, que dan como resultado la estimación de la probabilidad de excedencia para el valor de la intensidad del movimiento fuerte esperado en el emplazamiento, durante un tiempo dado permitiendo definir en su totalidad la peligrosidad sísmica, este tipo de metodología se subdivide en metodología no paramétrica: donde se evalúa la peligrosidad mediante las funciones de distribución de los valores extremos, es una de las más utilizadas en la que se fijan los valores extremos del parámetro elegido; dentro del procedimiento se determina el área de influencia, se calcula el valor máximo del parámetro (reflejando la sismicidad), se ajusta los valores extremos y se estima la probabilidad de excedencia del valor fijado y la metodología paramétrica, la cual está en función de estudios de suelo, de modelamientos de recurrencia, leyes de atenuación**.** Este se basa principalmente en la estimación de un modelo de zonas sismo-genéticas con las cuales se realiza una complementación con el área de influencia y su ajuste mediante un modelo de recurrencia, además de sumar la contribución dada por todas las fuentes para obtener la función de probabilidad de la peligrosidad en el emplazamiento; las fases para su desarrollo se pueden presentar como:

- Determinación de zonas sismo-genéticas (Método zonificado).
- Definición del modelo de recurrencia (Gutenberg Richter Truncado).
- Estimación de las leyes de atenuación aplicables a las zonas a manejar.
- Estimación de la peligrosidad total.

En el proyecto se implementó la metodología probabilística con enfoque paramétrico, es decir a partir de un proceso de análisis de recurrencia sísmico e identificación de las zonas sismológicas del modelo o también llamado método zonificado; debido a que la metodología determinista no permite asociar una probabilidad de excedencia al fenómeno y se centra netamente en las observaciones máximas además que no permite analizar la recurrencia de los sismos en él emplazamiento.

3.3.3. Análisis de Resultados

Para poder desarrollar un análisis válido para la información resultante, se necesita de tres factores fundamentales como: el análisis del proceso de desagregación de la peligrosidad; en la cual es posible identificar el sismo más probable para Bogotá D.C, la selección del modelo que explica mejor el comportamiento de la ciudad a partir del modelo de árbol lógico, y la comparación de los espectros de respuesta encontrados con los definidos por la norma sismo resistente colombiana (NSR 10).

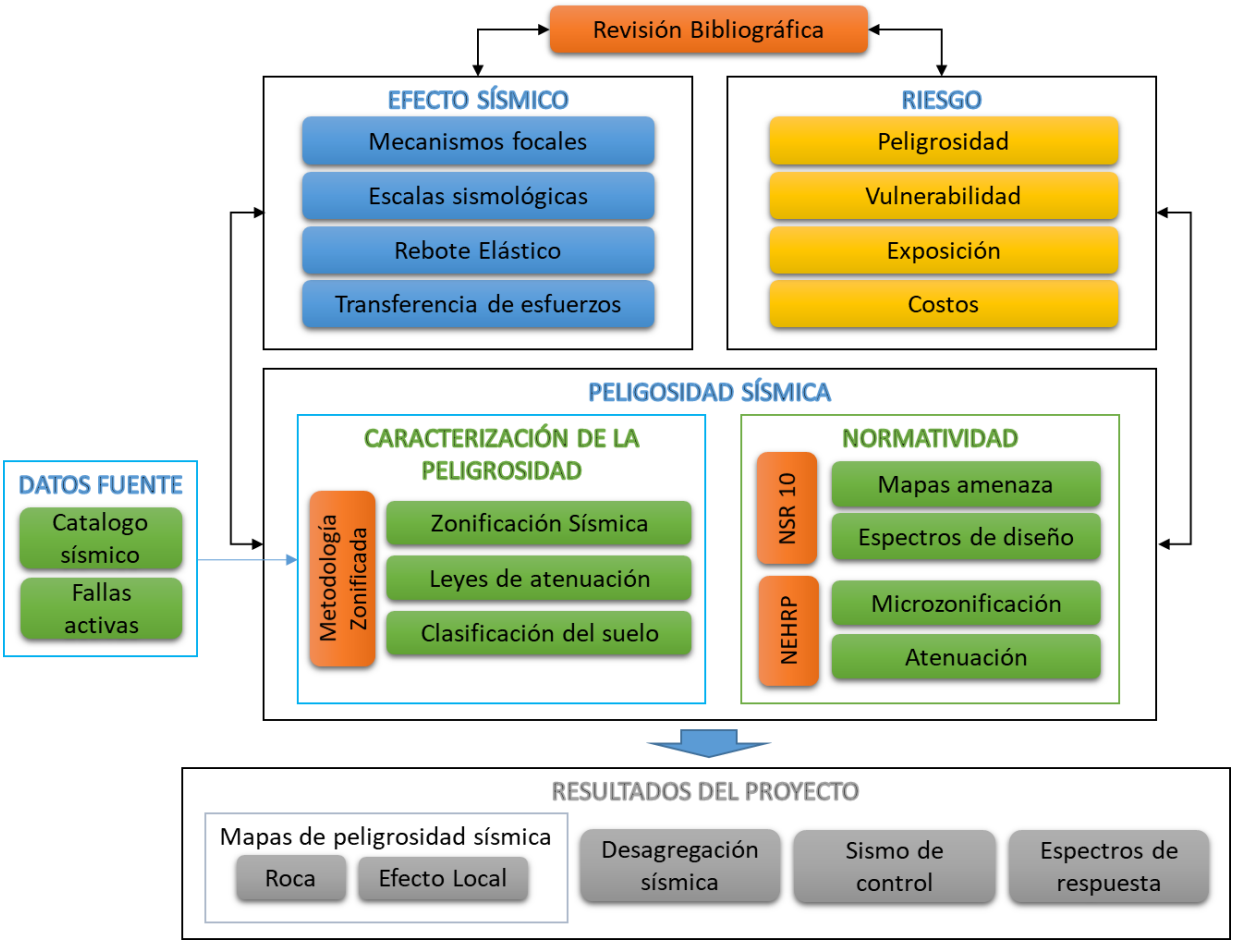


Ilustración 7: Metodología general del proyecto de investigación.
Fuente: elaboración propia.

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RECURRENCIA, PREDICCIÓN Y RIESGO

4.1. IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA

Como se mencionó durante el proyecto, el desarrollo de la propuesta se evidencia a través de la metodología general presentada en el *capítulo 1*; continuando con esta estructura es posible identificar las siguientes fases de desarrollo:

1. Recopilación de la información cruda: En esta fase se adquirió información asociada con la historia sísmica del país, que alimentan el desarrollo de una base de datos de partida en PostgreSQL que cuenta con toda la información sísmica y tectónica de la zona de influencia determinada para la ciudad de Bogotá, además se contó con información de la micro sismicidad del emplazamiento a estudiar, mapas de suelos, entre otros.
2. Preparación de entradas para el cálculo de la peligrosidad a través del método probabilístico zonificada, el cual explicaremos detalladamente a continuación (*ver ilustración 8*).

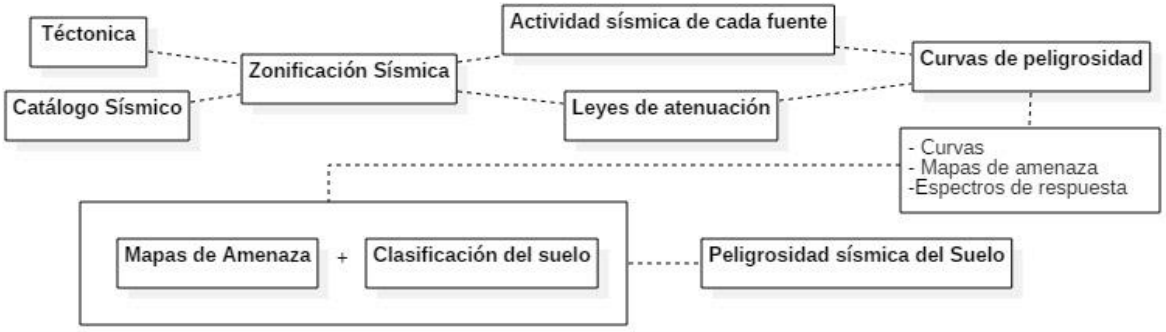


Ilustración 8: Preparación de las entradas de datos.
Fuente: Elaboración propia.

La metodología probabilístico zonificado parte de información técnica e histórica de la zona de estudio, con la cual es posible determinar la distribución sísmica en la ciudad; a partir de este procedimiento se combinó la información de la fuente con la zonificación sísmica planteada por el GEM (Global Earthquake Model - SARA) y con la zonificación planteada en este proyecto como medio para la determinación de parámetros necesarios para la definición de las zonas sismo-genéticas del proyecto, los cuales junto con la implementación de los modelos de atenuación respectivos y el desarrollo de la integral de peligrosidad permitirá obtener el planteamiento de la peligrosidad del emplazamiento en roca. Que al interactuar con la clasificación del suelo permiten estimar la peligrosidad sísmica del suelo en la ciudad de Bogotá.

3. Cálculo de la peligrosidad

- Cálculo del movimiento esperado para la ciudad de Bogotá D.C en roca.
- Desagregación de la amenaza sísmica: Este proceso permite el reconocimiento del sismo con una mayor contribución a la amenaza de la ciudad con un nivel de probabilidad asociado. Este sismo se denomina sismo de control, el cual está representado a partir de su Magnitud (M), distancia (R), además de un parámetro ε, el cual se encuentra relacionado con la variabilidad del modelo de predicción del movimiento fuerte o ley de atenuación asociado.

- Estimación de la amenaza incluyendo el efecto local del suelo en Bogotá D.C: En este procedimiento se busca aplicar el efecto sitio de la ciudad, es decir cómo se amplifica o de-amplifica el movimiento respecto a las variaciones de las condiciones físicas y de consolidación del suelo en roca con otros tipos de suelo de la ciudad. Para ello es necesario la definición geotécnica del suelo de la ciudad de Bogotá D.C y la asignación de los factores correspondientes con respecto al movimiento de entrada en roca.
- Caracterización del movimiento acorde con los resultados del estudio de la peligrosidad: Es decir, que es necesario la determinación de los espectros de respuesta sísmica representativos del movimiento.

A continuación, describiremos cada una de las fases correspondientes para la ejecución de la propuesta:

4.1.1. Análisis de la Sismicidad y la Tectónica de la Zona

Esta fase, se encuentra planteada de forma obligatoria a tratar dentro de un estudio de determinación de peligrosidad sísmica, puesto que es base con la que se determinan el conjunto de fuentes sísmicas que pueden llegar a representar un peligro potencial a un emplazamiento o población. A partir de este análisis se establece el marco de referencia para el resto del estudio, en el que se delimita la extensión del conjunto de sismos que pueda tener una influencia significativa, además de evidencia las características sísmicas generales de las fuentes.

Marco Sismo Tectónico Regional

Las fuentes sísmicas hace referencia al origen, ubicación, causante y desarrollo de un sismo; dentro del origen y causa se identifica que: existe una subdivisión entre la sismicidad natural y sismicidad inducida; en la natural los sismos se producen debido al choque de las placas tectónicas y a la liberación de energía de las fallas geológicas, aunque también se dan por procesos volcánicos, hundimiento de cavidades o movimientos de ladera (también conocido como colapso kárstico) (universia, 2010), en la sismicidad inducida los sismos son producidos por acción del hombre como las explosiones nucleares, la creación de grandes embalses, explotación minera y la fractura hidráulica. Para el proyecto se enfatiza cómo se produce un sismo naturalmente mediante la actividad tectónica es decir en los bordes de las placas y debido a la liberación de energía de las fallas geológicas.

El marco sismo tectónico dentro de la delimitación del proyecto se categoriza en dos tipos: la primera hace referencia al punto epicentral del sismo; lugar de ocurrencia del sismo y el segundo hace referencia a los sistemas de fallas es decir las zonas donde existe una fractura del subsuelo. En ambos casos se estudia el fallamiento cercano, el mecanismo focal, el diagrama de re radiación y la representación estereográfica de la falla.

Marco Sismo Tectónico y Geológico Local

Bogotá contiene un sistema especial en referente geológico y geotécnico, además contiene una condición de habitantes elevada y las construcciones débiles, genera un riesgo ante un sismo es por eso que debe ser estudiado.

A nivel sismo-técnico posee una serie de fallas locales en las cuales podemos resaltar la falla del Río Tunjuelo ubicada en la zona sur de la ciudad y es de tipo inversa o de cabalgamiento cubierta, también existe una que está cercana al centro de la ciudad denominada la falla de Bogotá que es de tipo inversa o de cabalgamiento, es importante describir que muchas de estas fallas tienen una actividad incierta al interior y en los alrededores de Bogotá, por ello es importante una actualización sobre la información de estas fallas y mejora en los instrumentos de captura de fallas.

En zonas de respuesta sísmica es importante resaltar que la mayoría de los suelos de Bogotá son lacustres (la zona en la que está la ciudad era un lago, pero se secó y por lo tanto son suelos blandos). Además, existen varias fallas geológicas que podrían hacer que Bogotá tuviera un sismo de grandes proporciones (Universia, 2010).

Desde el año 2002, Bogotá cuenta con un plan de emergencias que contempla la acción en caso de terremoto, esto teniendo en cuenta los sismos sentidos con daños y afectaciones en Bogotá y con el fin de prevenir sus daños en un hecho similar (*ver tabla 5*).

Tabla 5: Sismos con daños intermedios y severos en Bogotá D.C.

SISMOS CON DAÑOS INTERMEDIOS Y SEVEROS EN BOGOTÁ D.C			
Fecha	**Origen**	**Efectos en Bogotá**	**Intensidad**
18 de octubre de 1743	Páramo de Chingaza	Daños intermedios	VII
12 de julio de 1785	Páramo de Chingaza	Daños severos	VIII
17 de junio de 1826	Sopó	Daños intermedios	VII
16 de noviembre de 1827	Timaná (Huila)	Daños severos	VIII
31 de agosto de 1917	Páramo de Sumapaz	Daños severos	VIII
1 de noviembre de 1928	Valle de Tenza	Daños intermedios	VII
9 de febrero de 1967	Vegalarga	Daños intermedios	VI - VII

Fuente: El espectador, 2007.

De acuerdo con Luis Yamín, docente del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de Los Andes y experto en ingeniería sísmica y dinámica de estructuras, un terremoto producido en la Falla Frontal de la Cordillera Oriental, a 60 kilómetros de Bogotá, provocaría graves daños, pues además del movimiento propio, los suelos lacustres blandos de la ciudad podrían amplificar las ondas, desde abajo y cuya intensidad se aumentaría al llegar a la superficie (Universia, 2010).

4.1.2. Elaboración del Catálogo del Proyecto

Después de desarrollar el análisis sismo tectónico de la zona de estudio, se elabora el desarrollo del catálogo sísmico para el proyecto de investigación, en este deben incluirse todos los sismos potenciales que puedan afectar la zona de emplazamiento, en este caso la ciudad de Bogotá D.C.

Como se ha venido mencionando en este apartado se tiene en cuenta una distancia radial de 300 km con respecto a la ciudad de Bogotá ya que los trabajos sismológicos revisados sustentan que aquella área tiene máxima incidencia en la peligrosidad del emplazamiento, esto definido como una zona de influencia.

En este caso, el Servicio Geológico Colombiano - SGC presenta un servicio denominado búsqueda experta en el cual el investigador tiene la posibilidad de desarrollar una descarga de aquellos sismos que han sido recolectados desde el año 1993 hasta la fecha de actualización del proyecto (03 de agosto de 2017). Es importante mencionar que también es imprescindible tener en cuenta los registros del catálogo histórico brindados por el SGC. Para ello, se desarrolló un proceso de organización y depuración de los datos considerando: la homogeneización de las magnitudes, la depuración del catálogo e identificación de los años de referencia para los distintos rangos de magnitudes con la finalidad de analizar la completitud del catálogo, además se filtró aquellos sismos menores con magnitud menor a 3 Mw (Magnitud Momento) ya que no presentan una incidencia significativa en la peligrosidad.

Con lo anterior, se obtuvo un catálogo homogeneizado respecto a la Mw (Magnitud momento) y se ejecutó la corrección por la falta de completitud en los diferentes rangos de magnitud; a continuación, se muestra el proceso desarrollado para efectuar cada uno de los procesos expresados anteriormente.

Homogeneización y Depuración del Catálogo Experto

La homogeneización de un catálogo sísmico es un requerimiento para el procesamiento de datos, la razón subyace que al existir diferencias entre las escalas del catálogo se incurren en grandes inexactitudes, es indispensable conocer que al momento de descargar los catálogos de una misma fuente, estos tienden a estar en la misma escala, sin embargo, existen valores que no presentan la magnitud momento y otros que presentan la magnitud local, por esta razón es necesario re-escalar cada uno de estos valores de magnitud a la misma escala, por lo anterior se implementó la escala momento, porque es la que mejor representa la información y la más usada en dichos estudios de amenaza sísmica.

Respecto a los datos de partida; los datos del catálogo sísmico con un total de 132.929 registros captados desde el 01 de Junio de 1993 hasta 03 de Agosto del 2017, y en el caso del catálogo histórico se obtiene un total de 74 registros los cuales datan desde 16 de enero de 1644 al 09 de febrero del 2013, se unifica la información teniendo en cuenta el conjunto de atributos necesarios para el estudio, finalmente se cuenta con un total de 133.003 registros que cubren el periodo de tiempo entre las fechas: 16/01/1644 - 03/09/2017.

El procedimiento a seguir es: homogeneizar inicialmente los valores que no presentaban un valor de Mw, pero si se conocía el valor de Ml (Magnitud Local), por medio de un modelo econométrico (*ver ilustración 9*), es decir mediante una expresión de regresión lineal que represente la relación de las magnitudes momento en función de las locales. Para ello se tomaron aquellos registros que disponían de ambos tipos de magnitud, la siguiente imagen constata el resultado del modelo de regresión lineal, la distribución de los valores y el R2 que expresa el ajuste de los datos.

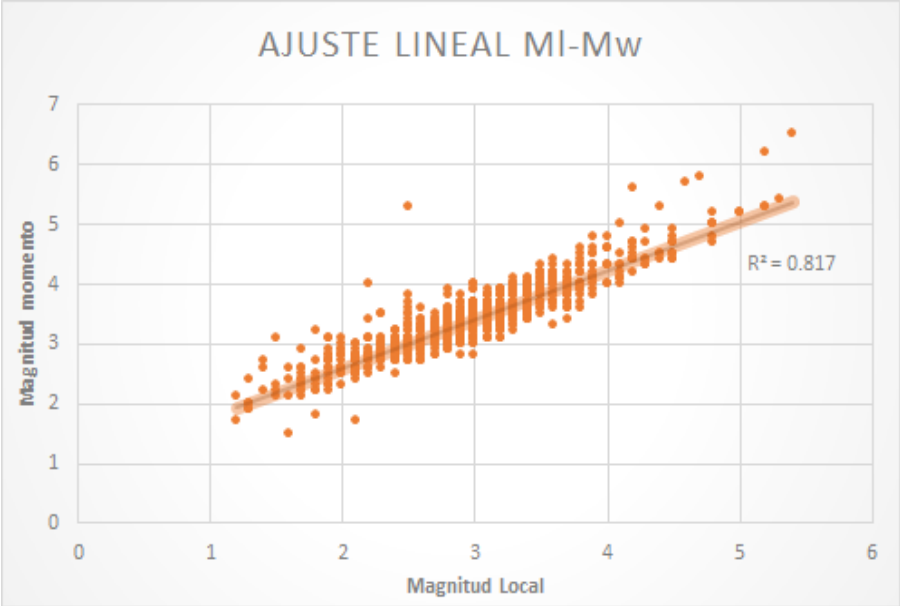


Ilustración 9: Ajuste de regresión lineal para las Magnitudes.
Fuente: Elaboración propia.

$$Mw = 1.088539 + 0.7566267\ Ml \tag{20}$$

Además, es necesario incluir factores de conversión para aquellos registros con medición de magnitud de ondas superficiales (Ms) y magnitud de ondas internas (Mb), llevado a cabo, mediante la aplicación de las ecuaciones planteadas, estimando la correlación entre ambos tipos de magnitudes con la magnitud momento, planteadas por Scordilis (2006), se elabora este procedimiento con el propósito de involucrar esta información en el análisis ya que incluye la sismos importantes ocurridos en la zona, alimentando la bases de datos del proyecto; las ecuaciones citadas anteriormente corresponden con:

Correlación aplicada para la estimación de Mw (Scordilis, 2006).

$$Mw = 0.67(\pm 0.005)\ Ms\ +\ 2.07(\pm 0.03)\ ;\ 3.0 \leq Ms \leq 6.1 \tag{21}$$

$$Mw = 0.99(\pm 0.02)\ Ms + \ 0.08(\pm 0.13)\ ;\ 6.2 \leq Ms \leq 8.1 \tag{22}$$

$$Mw = 0.85(\pm 0.04)\ Mb\ +\ 1.03(\pm 0.23)\ ;\ 3.5 \leq Mb \leq 6.2 \tag{23}$$

Teniendo en cuenta la homogeneización de escala de magnitud del conjunto de datos, es relevante identificar que esta metodología presume una distribución Poisson en el espacio, es decir que existe una independencia entre los sismos de una misma zona, en principio debe asumirse entre los eventos principales. Por lo tanto, es indispensable una depuración de las réplicas y premonitores del sismo, es decir aquellos sismos que presentan una relación temporal con los sismos principales; dejando así solamente el sismo principal.

Completitud

La completitud hace referencia al periodo de tiempo en el cual el catálogo sísmico se encuentran consignados todos y cada uno de los sismos presentados. Actualmente, es posible presentar

características de completitud debido al conjunto de herramientas disponibles para su captura, se concluye que a medida que transcurren los datos a través del tiempo, se observa que dicha información es captada de manera creciente gracias a los avances tecnológicos que permiten capturas de sismos pequeños ya que los sensores presentan mayor sensibilidad y precisión, por lo anterior se presume que en el caso de sismos pequeños o aquellos que no son sentidos por la población, presentaran una ampliación en años del catálogo para que este pueda considerarse completo (Belén Benito et al, 2008).

Por medio de este análisis, se identifica los periodos de tiempo en el cual se puede considerar completo el catálogo de sismos, dentro de los intervalos de magnitud establecidos. Para el presente trabajo se empleó un rango de magnitud acorde con los estudios revisados, y se consideraron intervalos de 0.9 unidades de magnitud, a partir del año 1993. Obteniendo así los años de referencia a partir del cual es posible acumular el número de terremotos por año. Acto seguido es importante identificar la fecha inicial para la que se considera una completitud para el proyecto.

En la *tabla 6* se visualiza los años de referencia obtenidos para el estudio de completitud para cada uno de los rangos definidos, además, son clasificados en función de la profundidad del sismo, ya sean superficiales (Corticales) o profundas (Subducción) esto debido a la subducción de placas.

Tabla 6: Años de referencia para el análisis de completitud

AÑOS DE REFERENCIA PARA EL ANÁLISIS DE COMPLETITUD		
Rango Mw	**Cortical**	**Subducción**
[3.07 - 3.9]	1993	1993
[3.9 - 4.8]	1993	1993
[4.8 - 5.7]	1993	1994
[5.7 - 6.6]	1993	1995
[6.6 - 7.5]	1957	1992
[7.5 - 8.4]	1958	-

Fuente: Elaboración propia.

Además, la *tabla 6* muestra la tasa normalizada de sismos ocurridos por año, en el cual es posible evidenciar los años de referencia para considerar el catálogo completo, como lo es para magnitudes M [3.0-5.6] Mw presentan un año de completitud de 1911, entre tanto las magnitudes M [5.7-6.6] Mw presentan un año de completitud de 1993, esto analizado a partir de la tasa acumulada de sismos a través de un análisis desarrollado en PostgreSQL por medio de su gestor de bases de datos PGADMIN.

En la *ilustración 10*, es posible identificar el aumento de la tasa de captura de sismos a partir de los instrumentos disponibles en los diferentes periodos de tiempo, en el cual es posible identificar una variación entre la tasa de crecimiento temporal por parte de las magnitudes de 3.07 - 5.7 y magnitudes de 5.7 – 8.4.

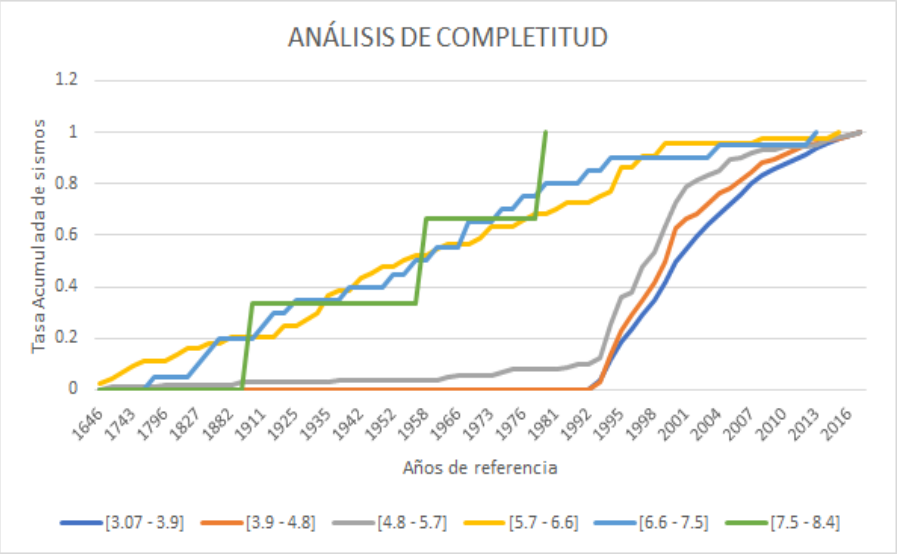


Ilustración 10: Análisis de completitud completa para sismo entre 3.07 y 4.8.
Fuente: Elaboración propia.

A partir de este proceso se identificó que el periodo necesario para que sea considerado completa la muestra, depende netamente del rango de magnitud utilizada, ya que para las magnitudes que oscilan desde 6.6 Mw a 7.5 Mw encontramos un periodo de completitud desde el año 1911 hasta la actualidad (*ver ilustración 11*), por lo cual no es descabellado pensar que debido a la facilidad de catalogar y recopilar información asociada a los sismos con grandes amplitudes. Por otro lado, en el caso de magnitudes de 3.0 Mw a 5.7 Mw encontramos que su completitud se da a partir del año 1993 hasta ahora (*ver ilustración 12*).

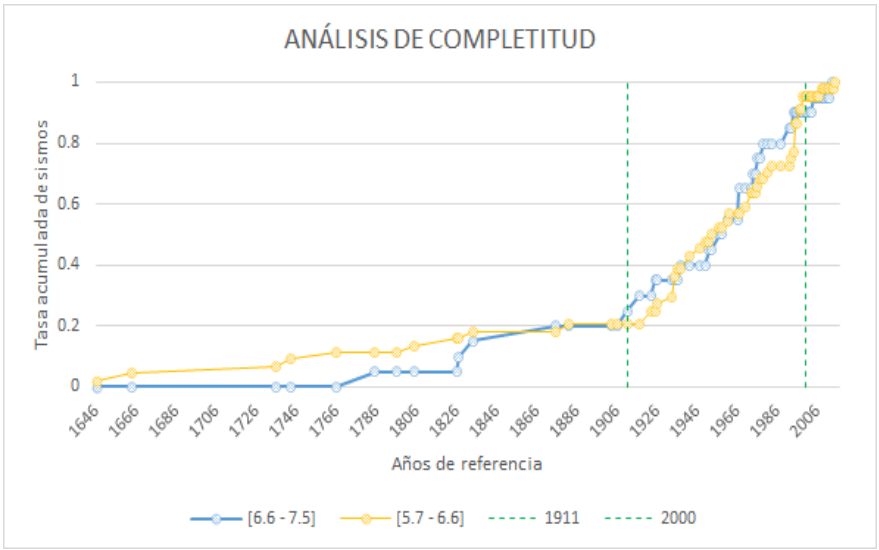


Ilustración 11: Análisis de completitud para los años entre 1911 y 2000.
Fuente: Elaboración propia.

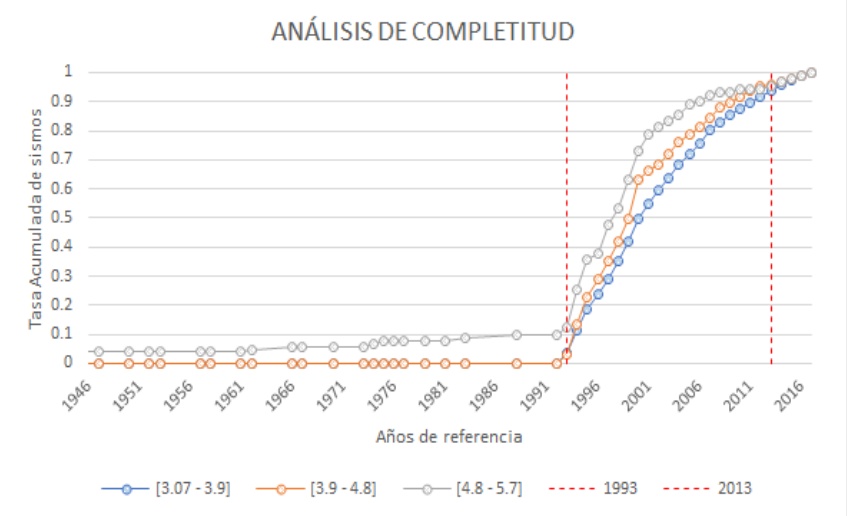


Ilustración 12: Análisis de completitud con años de referencia entre 1993 y 2013.
Fuente: Elaboración propia.

De lo anterior se concluye que es necesario generar una diferenciación entre la recurrencias de los sismos de una escala menor (3.0 Mw a 5.7 Mw) y de una escala mayor (6.6 Mw a 7.5 Mw), lo cual se encuentra íntimamente relacionado con la capacidad de adquisición de información respecto a la ocurrencia de sismos a lo largo del tiempo, es decir, que actualmente los centros sismológicos cuentan con instrumentación más sensible y precisa que logra la identificación de los movimiento telúricos de muy poca aceleración espectral (>2 Mw).

Catálogo Final del Proyecto de Investigación

El catálogo final que se manejo es el resultado del proceso de homogeneización, depuración, filtrado y corrección de la completitud mostrado anteriormente, el cual se realizó para una magnitud Mw > 3, y teniendo en cuenta que la mayoría de los procesos de falta de completitud se corrigieron al momento de desarrollar la depuración, todos los datos presentaban un año análogo a lo esperado al momento de corregir la completitud en los datos. Como resultado se obtuvo un catálogo final, el cual cuenta con un total de 13.436 sismos homogéneos, el cual fue utilizado para el desarrollar el estudio de peligrosidad pertinente, con un origen en las coordenadas (04°36′35″N, 74°04′54″W), y un radio de 300 km, en las *tablas 7 y 8* es posible encontrar la información asociada al catálogo resultante de dicho proceso y el conjunto de variables que lo definen.

Tabla 7: Catalogo sísmico depurado.

CATÁLOGO SÍSMICO DEPURADO	
Eventos sísmicos	13436
Período	1911 - 2017
Área	(04°36′35″N,74°04′54″W) Origen
Tipo de Magnitud	Magnitud Momento (Mw)
Rango de Magnitudes	3.0 - 8.4 Mw
Profundidad	0 - 700 Km

Fuente: Elaboración propia.

El catálogo cuenta con un total de 16 variables atribuidas a cada uno de los registros encontrados, cabe resaltar que los errores asociados a los valores sísmicos resultaron del estudio desarrollado por el SGC, de los cuales no se encuentra su información con respecto a los sismos históricos del país.

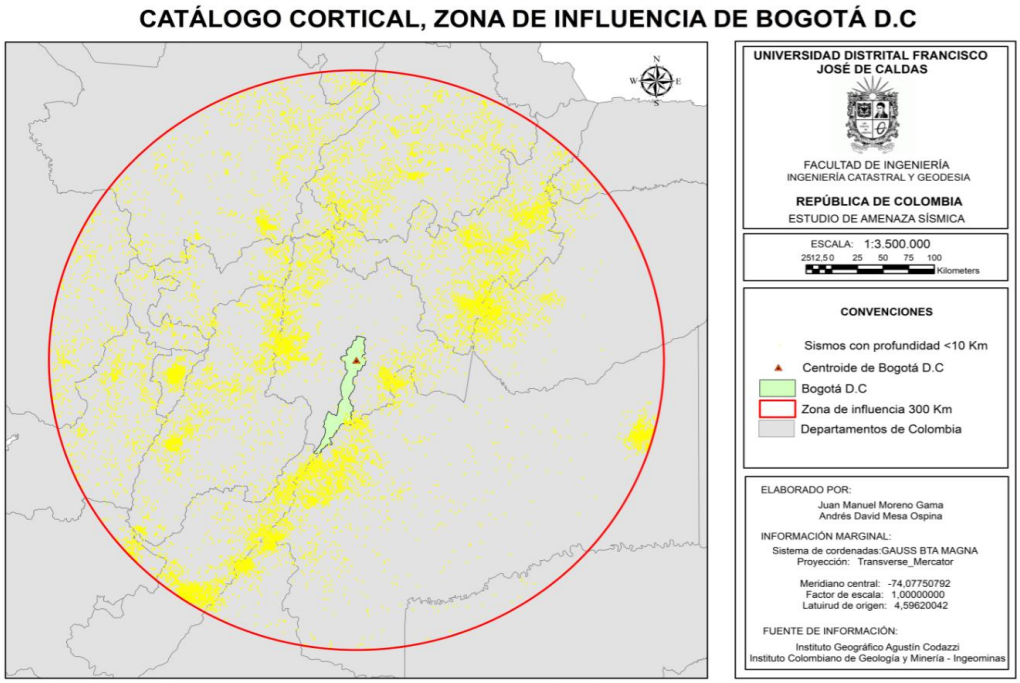
Tabla 8: Diccionario de entidades del catálogo sísmico.

VARIABLE	TIPO	NOMBRE
ID	Integer	Identificador
Fecha	Date (AA-DD-MM)	Fecha de ocurrencia del sismo
Hora	Character varying (hh:mm:ss)	Hora de ocurrencia del sismo
Latitud	Numeric (WGS84)	Latitud
Longitud	Numeric (WGS84)	Longitud
Profundidad	Numeric	Profundidad
Magnitud Ml	Numeric	Magnitud Local
Magnitud Mw	Numeric	Magnitud momento
Departamento	Character varying	Departamento
Municipio	Character varying	Municipio
Núm. Estaciones	Integer	Número de estaciones
RMS	Numeric	Error medio cuadrático
Gap	Integer	Distancia de ruptura
E. Latitud	Numeric	Error de Latitud
E. Longitud	Numeric	Error de Longitud
E. Profundidad	Numeric	Error de Profundidad

Fuente: Elaboración propia.

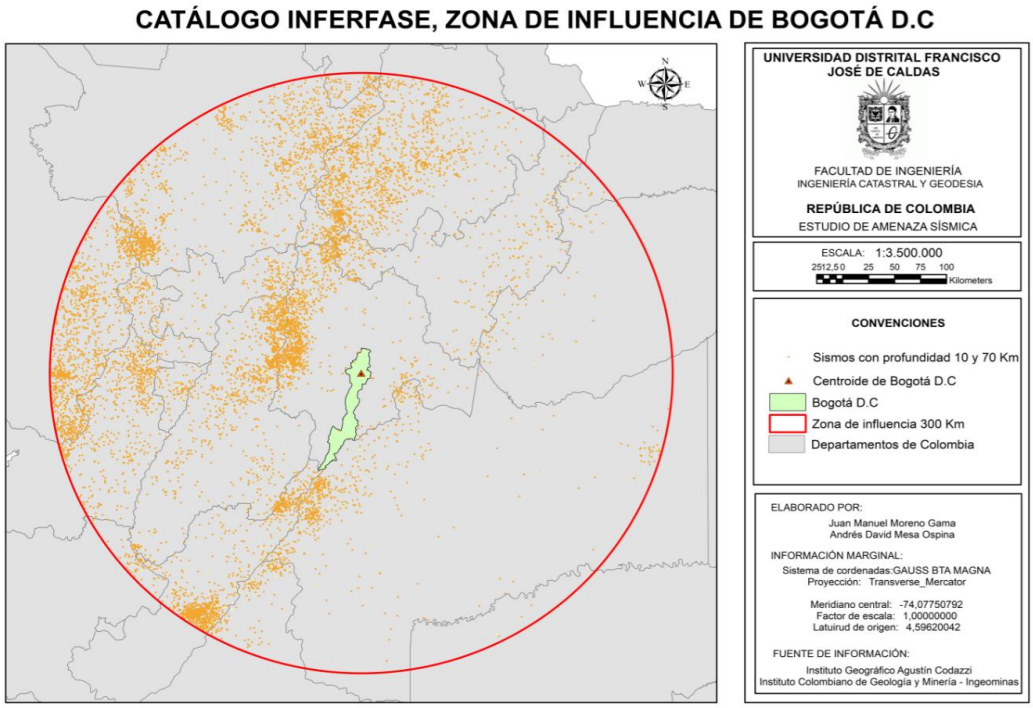
En función de estos sismos es posible la creación de tres mapas temáticos asociados con la ubicación de cada uno de los sismos del catálogo, los cuales se encuentran categorizados en función de la localización epicentral del emplazamiento y la profundidad de los sismos.

En el *Mapa 4* podemos identificar el conjunto de sismos que presentan una profundidad igual o inferior a 10 km [0-10 km], denominados como régimen tectónico cortical o superficial.



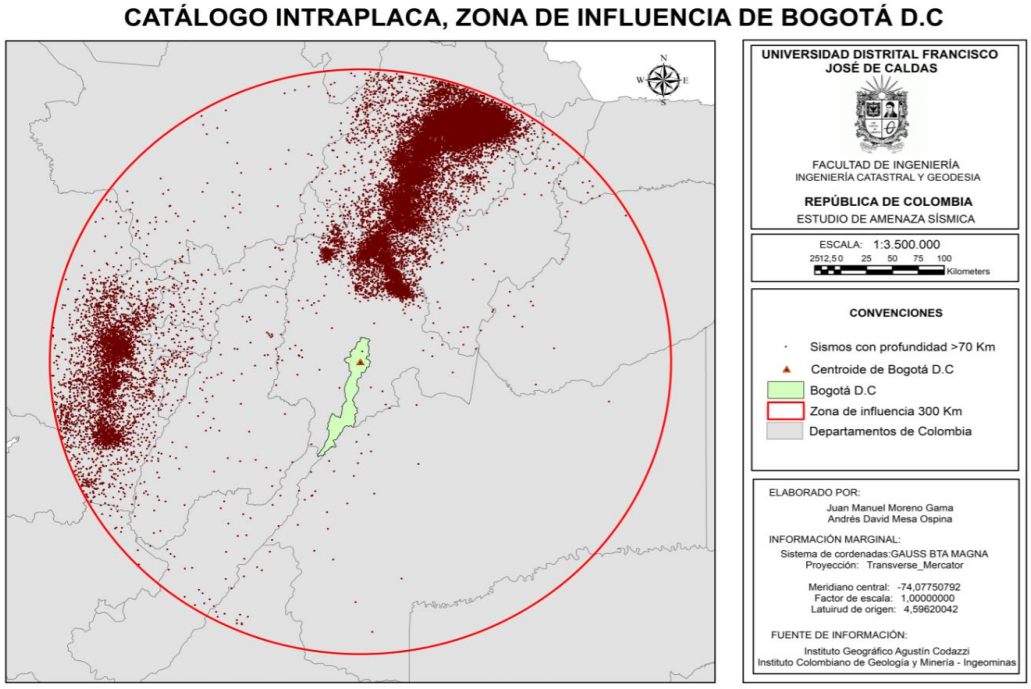
Mapa 4: Catálogo cortical en zona de influencia en Bogotá D.C.
Fuente: Elaboración propia.

En el *Mapa 5* podemos identificar el conjunto de sismos que presentan una profundidad igual o inferior a 10 - 70 km [10-70 km], denominados como el régimen tectónico interplaca o interfase.



Mapa 5: Catálogo interfase en zona de influencia en Bogotá D.C.
Fuente: Elaboración propia.

En el *Mapa 6* podemos identificar el conjunto de sismos que presentan una profundidad iguales o superiores a 70 km [>70 km], denominados régimen tectónico intraplaca o también denominado intrafase.



Mapa 6: Catálogo intraplaca en zona de influencia en Bogotá D.C.
Fuente: Elaboración propia.

4.1.3. Caracterización de las Fuentes Sísmicas

Como se ha mencionado desde el planteamiento del proyecto de investigación, la metodología implementada para hacer una caracterización de las fuentes sísmicas se desarrolló a partir de la metodología clásica zonificada (MCZ), en la que se emplean modelos de zonificación sismo-genéticas como representación para definir dichas fuentes; esta fue desarrollada en el año 1968 por Cornell, la cual se ha implementado últimamente en los proyectos de caracterización de la peligrosidad sísmica.

Esta metodología supone una distribución Poisson entre cada uno de los sismos ocasionado dentro de cada una de las zonas, es decir, supone que estos terremotos se encuentran definidos dentro de las zonas sismo-genéticas y estos se distribuyen de manera aleatoria espacial y temporalmente. Para poder definir cada una de estas zonas se debe desarrollar un estudio geotectónico, sísmico, suelos en el cual se deben englobar en una misma estructura (Polígono) aquellas fallas y estructuras geológicas que presentan patrones similares de sismicidad, esto con la finalidad de lograr diferenciar entre cada zona unos límites de magnitud máxima y recurrencia que sean bastante diferenciadas entre ellas. Esta metodología resulta ser bastante útil especialmente en los casos en los que no es posible conocer con detalle sus parámetros como para definir modelos individualizados que representan la sismicidad de la zona.

Un esquema general para desarrollar un modelo de zonificación para un estudio de peligrosidad necesita de la integración de un gran cúmulo de información asociada a las características del terreno, lo importante allí es el desarrollo de pruebas piloto que permitan la identificación correcta de dichas zonas las cuales representan en gran medida las condiciones que influyen en la peligrosidad (Mónica Arroyo, 2015):

- Tectónica
- Geomorfología
- Estructura de la corteza
- Geología
- Sismicidad
- Perfil sociológico del suelo
- Mecanismos focales (Relativamente nuevo)
- Sismos más fuertes
- Gravimetría

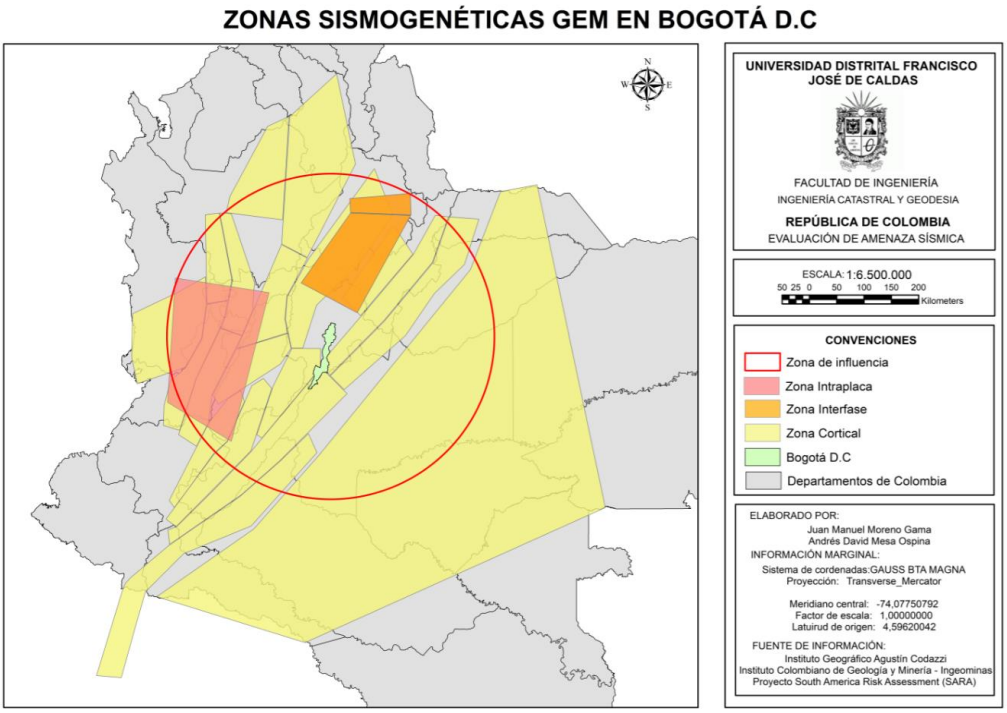
Zonificación Sísmica

Como se mencionó anteriormente para poder desarrollar este estudio de peligrosidad fue necesario implementar un conjunto de zonas sismo-genéticas que se acoplaron a las condiciones sísmicas del emplazamiento. Para esto se tuvo en cuenta dos criterios para su aplicación, el proyecto SARA desarrollado por la GEM, y un criterio netamente espacial planteado según la distribución espacial de los sismos que se encuentran dentro de la zona de influencia.

Para ambos modelos se establecieron tres regímenes tectónicos que permitieran la distribución de la variable de profundidad para la zonificación sísmica, estos fueron para fuentes con profundidades entre 0 - 10 km o corticales, para fuentes entre 10 - 70 km o subducción interplaca o interfase y aquellas fuentes con profundidades mayores a 70 km o subducción intraplaca.

1. **Zonificación Sísmica GEM**

Del proyecto SARA (GEM, 2015), se logró verificar un total de 42 zonas sismo-genéticas, las que se distribuyen de la siguiente manera: 30 zonas con régimen cortical, 7 zonas con régimen Interfase y 5 zonas con régimen intraplaca, las que fueron implementadas para desarrollar el modelo 1 definido en el árbol lógico del presente proyecto. En el *Mapa 7*, se muestran el conjunto de zonas partidas según el régimen de estas, cabe destacar que existe la posibilidad de que una misma zona conforme más de un régimen tectónico.



Mapa 7: Zonas sismo-genéticas temporales en Bogotá D.C.
Fuente: GEM, proyecto SARA.

2. Zonificación Sísmica Espacial

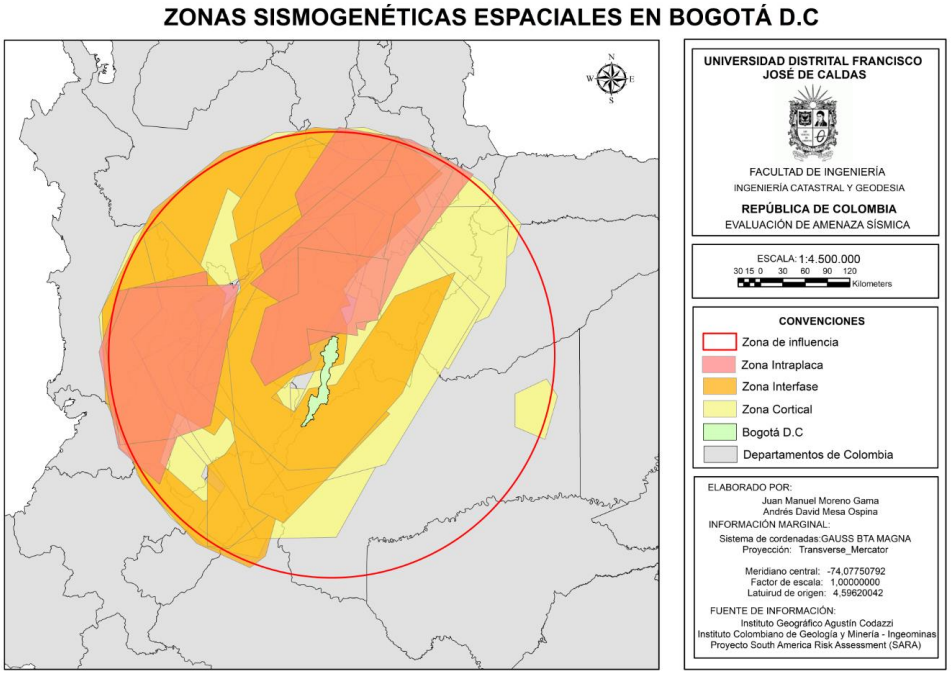
En el desarrollo de esta investigación, se decidió plantear un conjunto de zonas sismo-genéticas basadas netamente en las características espaciales del sismo, que permitieran desarrollar una estimación aproximada de las fuentes, por lo que se tuvo en consideración las tres variables principales que alteran el máximo sismo que se puede presentar en función de la Magnitud Mw, la profundidad y la distancia horizontal respecto al emplazamiento analizado.

Para ello fue necesario desarrollar un sistema de pesos, en el que se logró categorizar cada uno de los sismos puntuales recolectados en el catálogo sísmico depurado en función de dichas variables, determinando así el conjunto de zonas asociados a los diferentes regímenes manejados (Corticales, Interfase, Intraplaca) como un modelo exploratorio para la estimación de la peligrosidad. En donde d hace referencia a la distancia calculada desde el foco del evento sísmico al centro del emplazamiento; es decir la correlación de la distancia radial del epicentro al origen de Bogotá y la profundidad el evento sísmico. En sísmica se analiza los terremotos como una distribución de Poisson entendiéndose que los sismos son independientes en una zona específica, explicando que el valor esperado de los sucesos (d) es un valor positivo y un factor inverso a la asignación de pesos con α=1.

$$P = \frac{1}{\alpha d} * fm \tag{24}$$

Donde d: distancia radial respecto al emplazamiento
fm: Factor de magnitud del sismo

Obteniendo como resultado un total de 12 zonas sismo-genéticas especializadas dentro de la zona de influencia (300 km), de las cuales 4 hacen referencia al régimen cortical, 4 al régimen interplaca y 4 al régimen interplaca (ver *Mapa 8)*. Estas fueron implementadas para desarrollar el cálculo de la peligrosidad en roca a partir del modelo 2 representado en el modelo de árbol lógico.



Mapa 8: Zonas sismo-genéticas especiales en Bogotá.
Fuente: Elaboración propia.

Una vez definido el conjunto de sub zonas, es necesario asociar la sismicidad de cada zona a través de las leyes de recurrencia, que como se mencionó en el marco teórico permiten relacionar el tamaño de los sismos localizados en cada zona con su frecuencia acumulada, expresando así la distribución temporal de las intensidades. El análisis de peligrosidad asume que la ley de recurrencia es extrapolable para la predicción de la sismicidad en el futuro.

Para este proyecto se implementó la **Ley Gutenberg-Richter** (Gutenberg y Richter, 1944), la cual establece una proporción entre los sismos de magnitud elevada con respecto a los de Magnitudes bajas, logrando expresar los valores de la intensidad temporalmente; para ello se asume que el logaritmo de la cantidad de sismos acumulados se comporta de manera lineal con respecto a la magnitud.

A partir de esta ley, se identifican parámetros relevantes para definir la recurrencia de los sismos presentes en cada zona sismo-genética, entre ellos identificamos la tasa anual de ocurrencia $\tau(M)$ la cual permite estimar el número de sismos que superan dicha magnitud; para ello se dividen el número de terremotos N de una magnitud específica por el periodo de completitud, dicha tasa se considera constante para el periodo de estudio.

$$\tau(M) = \frac{N(M)}{TC} = \frac{e^{\propto -\beta M}}{TC} \tag{25}$$

Los parámetros necesarios para realizar la caracterización sísmica de cada fuente son: la Magnitud mínima (M min), Magnitud Máxima (M Max), Tasa acumulada de sismos que superan la Magnitud mínima $\tau(M)$, las que permiten a través de una regresión lineal definir la pendiente y el punto de intersección para la ley de recurrencia *(ver ilustración 13)*, en donde:

- La pendiente es valor negativo que relaciona la cantidad de sismos de magnitud alta con respecto a los sismos de magnitud baja.
- El punto de corte con el eje x representa el número mínimo de sismos que se han presentado en la zona sismo-genética las cuales superan la magnitud mínima definida.

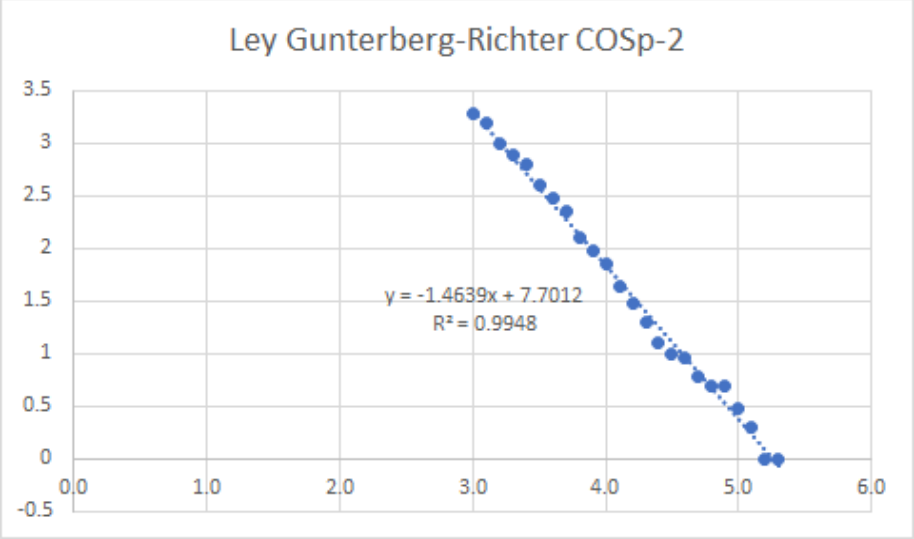


Ilustración 13: Aplicación de ley Gutenberg-Richter.
Fuente: Elaboración propia.

A partir de este procedimiento se definen un conjunto de variables por zona sismo-genética para la implementación del modelo, entre ellas encontramos: régimen tectónico, profundidad, profundidad de diseño, magnitud mínima, tasa de ocurrencia de sismos, a, b, R2, sigma de beta, magnitud máxima y el error de la magnitud máxima; este proceso se desarrolla para ambas zonificaciones sismo-genéticas, tal y como se muestran en las *Tablas 9 y 10.*

Tabla 9: Parámetros de la zonificación sísmica – Temporal.

Régimen	Código Zona	Profundidad (km)	Profundidad diseño	M0	Lambda (M0)	a	b	B	R2	Sigma β	M máx.	Sigma M máx.
Cortical	Coc-5	1.76	[0-10]	3	1.126389928	4.6992	1.0891	2.50774542	0.9724	0.1	4.2	0.1
	Coc-6	3.44	[0-10]	3	3.063999981	5.2697	1.1344	2.61205253	0.9336	0.1	5	0.1
	Coc-7	1.3	[0-10]	3.5	3.223582269	4.9262	0.8679	1.9984136	0.9783	0.1	6	0.1
	Coc-8	1.71	[0-10]	3.5	3.104121832	5.1681	0.9417	2.16834438	0.9545	0.1	5.9	0.1
	Coc-9	1.06	[0-10]	3	1.77864288	4.5655	0.9784	2.25284925	0.9701	0.1	4.9	0.1
	Coc-10	2.8	[0-10]	3.5	3.825945315	5.8252	1.1035	2.54090265	0.9889	0.1	5.1	0.1
	Coc-11	2.84	[0-10]	3	2.779641316	5.0597	1.0785	2.48333802	0.9414	0.1	4.4	0.1
	Coc-13	3.22	[0-10]	3	2.649041477	5.1696	1.1221	2.58373073	0.9447	0.1	4.6	0.1
	Coc-14	2.23	[0-10]	3	1.247351226	4.3343	0.9527	2.19367282	0.9146	0.1	4.9	0.1
	Coc-15	3.4	[0-10]	3	3.896626308	4.367	0.7987	1.83907471	0.9441	0.1	5.8	0.1
	Coc-16	2.84	[0-10]	3.5	1.542370671	6.0295	1.2746	2.93487496	0.9697	0.1	4.6	0.1
	Coc-18	3.12	[0-10]	3.5	5.700838767	6.1489	1.1465	2.63991381	0.9957	0.1	5.4	0.1
	Coc-19	2.43	[0-10]	3	1.424586283	4.9875	1.1512	2.65073596	0.913	0.1	4.4	0.1
	Coc-20	3.25	[0-10]	3	1.739757664	3.5893	0.6562	1.51095634	0.9662	0.1	5.8	0.1
	Coc-24	2.51	[0-10]	2.5	1.687674771	3.891	0.9134	2.10318122	0.9431	0.1	4.6	0.1
	Coc-25	2.61	[0-10]	3.5	2.217883645	7.2082	1.5663	3.60653903	0.9704	0.1	4.4	0.1
	Coc-26	2.93	[0-10]	3	1.53493065	6.1974	1.5437	3.55450061	0.9643	0.1	3.9	0.1
Interplaca	COSi-5	25.78	[10-70]	3	3.002539699	6.0367	1.393	3.20750103	0.9748	0.1	6	0.1
	COSi-6	22.78	[10-70]	2	3.359609172	3.2737	0.6836	1.57404717	0.9731	0.1	5.1	0.1
Intraplaca	COSp-2	120.8	[>70]	3.5	15.75211081	7.7012	1.4639	3.37075432	0.9948	0.1	5.3	0.1
	COSp-3	119.03	[>70]	3.5	9.83985635	4.553	0.6228	1.43405	0.9574	0.1	7.2	0.1
	COSp-4	145.63	[>70]	4	12.003005	8.3818	1.3014	2.99658424	0.9846	0.1	6.8	0.1

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10: Parámetros de la zonificación sísmica – Espacial.

Régimen	Código Zona	Profundidad (km)	Profundidad diseño	M0	Lambda (M0)	a	b	β	R2	Sigma β	M máx.	Sigma M máx.
Cortical	Ccoes2	2.76	[0-10]	3	31.67296773	10.221	2.4467	5.63373495	0.949	0.1	4	0.1
	Ccoes3	2.3	[0-10]	3.5	5.295277914	8.4153	1.8032	4.15202144	0.9815	0.1	4.6	0.1
	Ccoes4	2.11	[0-10]	4	4.422713004	6.2887	1.0657	2.45386493	0.9892	0.1	6	0.1
Interplaca	Cines1	30.84	[10-70]	3	11.75949734	15.605	4.3848	10.0963751	0.9561	0.1	3.5	0.1
	Cines2	30.57	[10-70]	3	12.9267324	8.789	2.0991	4.83335637	0.9813	0.1	4.2	0.1
	Cines3	24.74	[10-70]	3	5.918188017	6.5936	1.4804	3.40874697	0.9842	0.1	4.5	0.1
	Cines4	21.31	[10-70]	4	0.835004389	6.1459	1.211	2.78843055	0.967	0.1	5.3	0.1
Intraplaca	Cipes1	147.84	[>70]	3.5	24.22639301	16.411	3.899	8.97777928	0.9122	0.1	4.3	0.1
	Cipes3	134.52	[>70]	4	8.007349012	5.9517	0.917	2.11147053	0.8926	0.1	6.4	0.1
	Cipes4	117.92	[>70]	4	0.755246564	5.4787	1.0551	2.42945753	0.9717	0.1	5.3	0.1

Fuente: Elaboración propia.

Magnitudes Máximas de las Fuentes

En la mayoría de los trabajos analizados, se define la magnitud máxima de cada zona, como un proceso clave para el estudio de la peligrosidad sísmica; este valor considera una gran incertidumbre, especialmente por las generalizaciones llevadas a cabo por el proceso de zonificación. Este valor es calculado a partir del estudio del catálogo sísmico por zona, que es considerado como una buena aproximación de la magnitud máxima, sin discernir entre el valor máximo esperado por las fallas contenidas en cada zona sismo-genética.

Tabla 11: Magnitudes máximas de las fuentes.

REGIMEN	CÓDIGO ZONA	FALLA REPRESENTATIVA	ACTIVIDAD	TIPO DE FALLA
CORTICAL	Coc-10	Falla de arrugas	Potencialmente activa	Falla inversa o de cabalgamiento
	Coc-10	Falla de arrugas	Potencialmente activa	Falla inversa o de cabalgamiento
	Coc-11	Falla de Palestina	Activa	Falla de rumbo dextral
	Coc-11	Falla de Palestina	Activa	Falla de rumbo dextral
	Coc-12	Falla de cauca – Almaguer	Activa	Falla
	Coc-12	Falla de Mistrató	Actividad incierta	Falla cubierta
	Coc-13	Falla de San Juan	Actividad incierta	Falla inversa o de cabalgamiento
	Coc-14	Falla de Cali – Patía	Actividad incierta	Falla cubierta
	Coc-15	Falla de cauca – Almaguer	Activa	Falla
	Coc-15	Falla de Silvia – Pijao	Activa	Falla
	Coc-16	Falla de Ibagué	Activa	Falla de rumbo dextral
	Coc-17	Falla de Altamizal	Actividad incierta	Falla inversa o de cabalgamiento
	Coc-18	Falla de Algeciras	Activa	Falla de rumbo dextral
	Coc-19	Falla de la plata – Chusma	Potencialmente activa	Falla inversa o de cabalgamiento
	Coc-20	Falla de Avirama	Actividad incierta	Falla inversa o de cabalgamiento
	Coc-24	Falla de El Doncello Sur	Actividad incierta	Falla inversa o de cabalgamiento
	Coc-25	Falla del Meta	Actividad incierta	Falla inferida
	Coc-26	Falla del Cauca - Almaguer	Activa	Falla
	Coc-26	Falla de Silvania – Pijao	Activa	Falla
	Coc-26	Falla de cauca – Almaguer	Activa	Falla
	Coc-5	Falla de la Concha	Actividad incierta	Falla
	Coc-6	Falla de Cimitarra	Activa	Falla de rumbo dextral
	Coc-6	Falla de Palestina	Activa	Falla de rumbo dextral
	Coc-6	Falla de Palestina	Activa	Falla de rumbo dextral
	Coc-7	Falla de Pajarito	Activa	Falla inversa o de cabalgamiento
	Coc-7	Falla de Tesalia	Potencialmente activa	Falla inversa o de cabalgamiento
	Coc-8	Falla de Lengupí	Potencialmente activa	Falla inversa o de cabalgamiento
	Coc-8	Falla de Santa María	Potencialmente activa	Falla inversa o de cabalgamiento
	Coc-9	Falla de Boyacá	Potencialmente activa	Falla inversa o de cabalgamiento
INTERFASE	COSi-5	Falla de Chital	Actividad incierta	Falla inversa o de cabalgamiento
	COSi-6	Falla de arrugas	Potencialmente activa	Falla inversa o de cabalgamiento

INTRAPLACA	COSp-2	Falla de Riachuelo	Actividad incierta	Falla inversa o de cabalgamiento
	COSp-3	Falla de cauca – Almaguer	Activa	Falla
	COSp-3	Falla de cauca – Almaguer	Activa	Falla
	COSp-3	Falla de Ibagué	Activa	Falla de rumbo dextral
	COSp-3	Falla de Palestina	Activa	Falla de rumbo dextral
	COSp-3	Falla de Silvia – Pijao	Activa	Falla
	COSp-3	Falla de Silvia – Pijao	Activa	Falla
	COSp-3	Falla de Silvia – Pijao	Activa	Falla
	COSp-4	Falla de arrugas	Potencialmente activa	Falla inversa o de cabalgamiento

Fuente: Elaboración propia.

En la *Tabla 11* se puede evidenciar la correspondencia de cada zona sismogenética respecto con las diferentes fuentes sísmicas presentes en la zona, teniendo en cuenta la falla que representa un mayor grado de potencialidad en función de la distribución de Poisson del riesgo sísmico. Adicionalmente, podemos identificar el estado actual de la falla, es decir, si presenta alguna actividad sísmica en los últimos años y la tipología de la falla según sus características físicas.

4.1.4. Modelos de Movimiento Fuerte o Leyes de Atenuación (GMPE)

Una vez definido la caracterización sísmica de las zonas sismo-genéticas del proyecto, es obligatorio conocer cómo varía el movimiento esperado del terreno a causa de los sismos originados en cualquiera de dichas fuentes, para ello se implementan los modelos de movimiento fuerte o sus siglas en inglés GMPE (Ground Motion Prediction Equation), también denominados modelos de atenuación sísmica, que permiten simular las condiciones de la propagación de la onda fuente-sitio.

Cabe destacar que esta simulación depende netamente del movimiento generado por la fuente y la distancia del mismo al emplazamiento. Estos modelos han sido desarrollados a lo largo del tiempo con la finalidad de facilitar el cálculo de la atenuación de la onda según las características geológicas y físicas que afectan la propagación, para este caso se referencia la magnitud y la distancia recorrida.

Estos modelos pueden ser desarrollados de manera empírica como teórica. De manera empírica se deduce a través de los datos de acelerómetros registrados de diferentes sismos ocurridos, todo esto por medio de un modelo econométrico ajustado a partir de una expresión matemática; mientras que los modelos teóricos se construyen a partir de las características físicas, propagación y amplificación de la energía sísmica.

Los modelos econométricos tienen como característica principal un amplio escenario, sin embargo, deben existir condiciones similares que permitan el acoplamiento de las condiciones iniciales planteadas por cada modelo. Por lo que, al no existir modelos específicos para identificar el movimiento fuerte en Colombia, fue necesario desarrollar un análisis entre los modelos desarrollados y publicados hasta ahora con la finalidad de seleccionar aquellos que presenten

afinidad tectónica y condiciones físicas similares para el entorno de Bogotá, además de basarse en estudios similares desarrollados por las diferentes Alcaldías del país.

Se identifica que los modelos que mejor representan las características del suelo de Bogotá y el manejo de los diferentes regímenes tectónicos utilizados, son los correspondientes a los modelos de Campbell y Bozorgnia 2013, Zhao et al 2006 y Youngs et al 1997. Sin embargo, de los modelos anteriores se descartó la posibilidad de implementar el modelo Campbell y Bozorgnia 2013 al no existir la posibilidad de relacionarlo con las características físicas planteadas por la NEHRP. Estos modelos fueron combinados en el Árbol lógico del proyecto con la finalidad de lograr identificar la incertidumbre propia de los modelos, permitiendo así identificar una combinación acorde con las características del suelo. Estos modelos se presentan a continuación.

A. Modelo Zhao et al. 2006

Este modelo fue desarrollado en Japón y según su definición permite su implementación en todos los regímenes definidos, por lo que para el árbol lógico este se encuentra vinculado en cada una de las subdivisiones, además cumple con condiciones generales como lo es el rango de magnitudes. Este modelo está definido así:

$$\log_e y = a\, M_w + bx - \log_e r + e(h - h_c)\delta_h + F_R + S_I + S_S + S_{SL} \log_e x + C_k \qquad (26)$$

Donde:

$$r = x + c \exp(dM_w) \quad ; \quad y: cm/s^2 \qquad (27)$$

$$a = 1.101\,, b = -0.00564, c = 0.0055, d = 1.080, e = 0.01412 \qquad (28)$$
$$F_R = 0.251, S_I = 0.000, S_S = 2.607, S_{SL} = -0.528 \qquad (29)$$
$$C_H = 0.283, C_1 = 1.111, C_2 = 1.344, C_3 = 1.355, C_4 = 1.420 \qquad (30)$$
$$\sigma = 0.604\ (entre\ evento), \tau = 0.398\ (entre\ evento) \qquad (31)$$

- Excluye datos a distancias mayores de 300 km, y elimina parcialidades introducidas por instrumentos (Untriggering).
- No es aplicable para datos de Chile o México (Zhao et al, 2006), ya que Chile presentan un conjunto de zonas (2 extremos con características de subducción opuestas) y México por un débil conjunto de zonas.

B. Modelo Youngs et al. 1997

Este modelo a diferencia del anterior solamente se encuentra definido para las regiones de subducción (Interplaca e Intraplaca) y presenta una gran aceptación alrededor del mundo, por lo que ofrece los coeficientes de PGA, PGV y SA de periodos hasta los 3 segundos, además de presentar una diversificación en el tipo de falla (Normal e inversa); Tiene en cuenta la profundidad y la desviación estándar de la magnitud, además es posible en este vincular información de sitio o efecto local en función de la capa sedimentaria, al identificar variaciones del modelo tanto para

suelo como para roca, a continuación solamente mostraremos el modelo para roca, que se implementó en el desarrollo del árbol lógico.

$$\ln PGA = C_1^* + C_2 M + C_3^* \ln\left[r_{rup} + e^{C_4^* - \frac{C_2}{C_3} M}\right] + Z_{SS} C_5 + Z_t C_8 + C_9 H \quad (32)$$

Donde

$$C_1^* = C_1 + C_3 C_4 - C_3^* C_4^* \quad (33)$$

$$C_3^* = C_3 + C_6 Z_{SS} \quad (34)$$

$$C_4^* = C_4 + C_7 Z_{SS} \quad (35)$$

$$C_1 = 0.2418, C_2 = 1.414, C_3 = -2.552, C_4 = \ln 1.7818\,, C_8 = 0.3846, C_9 = 0.00607 \quad (36)$$

$$\sigma = 1.45 - 0.1\,M \quad (37)$$

- Utiliza tres categorías de sitio para hacer la regresión, pero solamente reporta resultados de profundidad de roca y suelo
- Considera la tectónica interfase = 0 e intraplaca = 1
- Maneja una profundidad focal entre 10 – 229 km

4.1.5. Cálculo de la Amenaza Sísmica en Roca

Una vez finalizado la ejecución de los procesos preliminares para el cálculo de la amenaza sísmica como la caracterización de las fuentes y la selección de los modelos de atenuación. Se procedió a calcular la peligrosidad en el emplazamiento, es decir, calcular la probabilidad que los terremotos producidos en cada fuente (Zona sismo-genética) generen un movimiento en Bogotá que iguale o rebase una amplitud establecida. Este proceso se desarrolló resolviendo la integral de peligrosidad planteada en el modelamiento de la peligrosidad (Cap. 4), obteniendo como resultado la probabilidad de excedencia de un valor que define el movimiento (terna de valores [M, R, ε]).

Para el desarrollo del cálculo probabilístico mencionado anteriormente se implementó el software libre CRISIS 2014, el cual fue desarrollado por Ordaz y su grupo de trabajo de la Universidad Autónoma de México (Ordaz, et al, 2014) el cual permite desarrollar las funciones de probabilidad en intervalos de magnitud y distancias especificados por el usuario; este software presenta gran facilidad de adquisición ya que es open-source además de presentar una interfaz amigable al usuario y un procesamiento supervisado en cada uno de los procesos de cálculo en comparación de otros software libre.

Cabe resaltar que este procedimiento contó con una serie de términos definidos con anterioridad en el software para facilitar el procesamiento de la información, estos fueron: Aceleración pico que hace referencia al periodo T = 0.0 o PGA y las diferentes aceleraciones espectrales SA asociados a 9 periodos estructurales T = PGA, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0 segundos expresados en gales.

Para el desarrollo de los mapas de amenaza en roca se realizaron krigeados ordinarios (método de interpolación), para los que es necesario implementar una malla de puntos compuesta por un total

de 28 x 60 nodos y un incremento de 0.02 grados entre puntos tanto para latitud como longitud. Esta malla cubre en su totalidad la ciudad de Bogotá por lo que recubre desde 74.5W de longitud y 3.68 N de latitud, así la cobertura de la ciudad será suficiente para que las interpolaciones distribuyan homogéneamente la peligrosidad.

Metodología del Árbol Lógico

El árbol lógico es una metodología de trabajo con el cual es posible cuantificar las incertidumbres propias de los modelos implementados, por lo que podemos desarrollar diferentes combinaciones entre los modelos con la finalidad de reducir la desviación estándar y brindar una mayor fiabilidad al cálculo de peligrosidad *(Ver ilustración 14 y 15).*

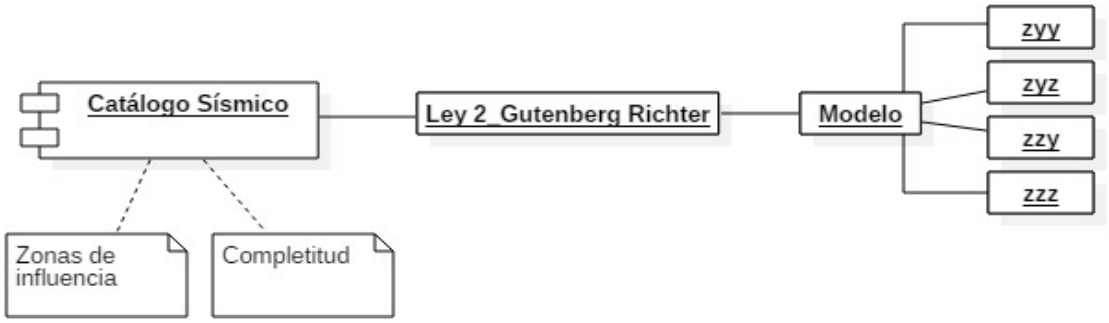


Ilustración 14: Zonas de amenaza sísmica Colombia.
Fuente: (NSR 10, 2010).

El árbol consta actualmente de dos nodos principales los cuales se originan después de la definición de las fuentes, es decir que hacen referencia a los dos modelos de zonificación sísmica desarrollados para el proyecto; de allí encontramos para cada uno de estos nodos cuatro ramas, los que hacen referencia a las diferentes combinaciones entre los modelos de atenuación guardando las características inherentes de los modelos según el régimen. Estas cuatro ramas son aplicadas para cada una de las fuentes de cada modelo, en esta metodología se suelen dar valores de confianza a cada una de las ramas, por lo que en nuestro caso manejaremos la desviación estándar resultante en el paso de análisis. Estas ramas son: CESzyy, CESzyz, CESzzy, CESzzz, COzyy, COzyz, COzzy, COzzz.

Estas ramas hacen referencia al total de las combinaciones de cada uno de los modelos, por lo que, para facilitar su asociación, fraccionamos dicha codificación en dos, las letras mayúsculas que corresponden al modelo que pertenece y las letras minúsculas a la combinación de los modelos, así:

- CO: Hace referencia a la rama del modelo Colombia planteadas en el Proyecto SARA de la GEM, también denominado temporal en nuestro proyecto.
- CES: Estas siglas hacen referencia al modelo espacial, en el cual solamente se plantean las características espaciales como parámetros para desarrollar la zonificación sísmica.

Ahora bien:

- zyy: Corresponde a la asignación del modelo Zhao et.al. 2006 para el régimen cortical, mientras que para las zonas que se asocian a los regímenes interfase e intraplaca se implementa el modelo Youngs et.al. 1997.
- zyz: Corresponde a la asignación del modelo Zhao et.al. 2006 para los regímenes corticales e intraplaca, mientras que para el régimen interfase se implementó el modelo Youngs et.al. 1997.
- zzy: Corresponde a la asignación del modelo Zhao et.al. 2006 para los regímenes corticales e interfase, mientras que para el régimen intraplaca se implementó el modelo Youngs et.al. 1997.
- zzz: Finalmente y debido a la imposibilidad de manejar el modelo Youngs et.al. 1997 para los regímenes corticales, decidimos implementar para todos los regímenes el modelo Zhao et.al. 2009.

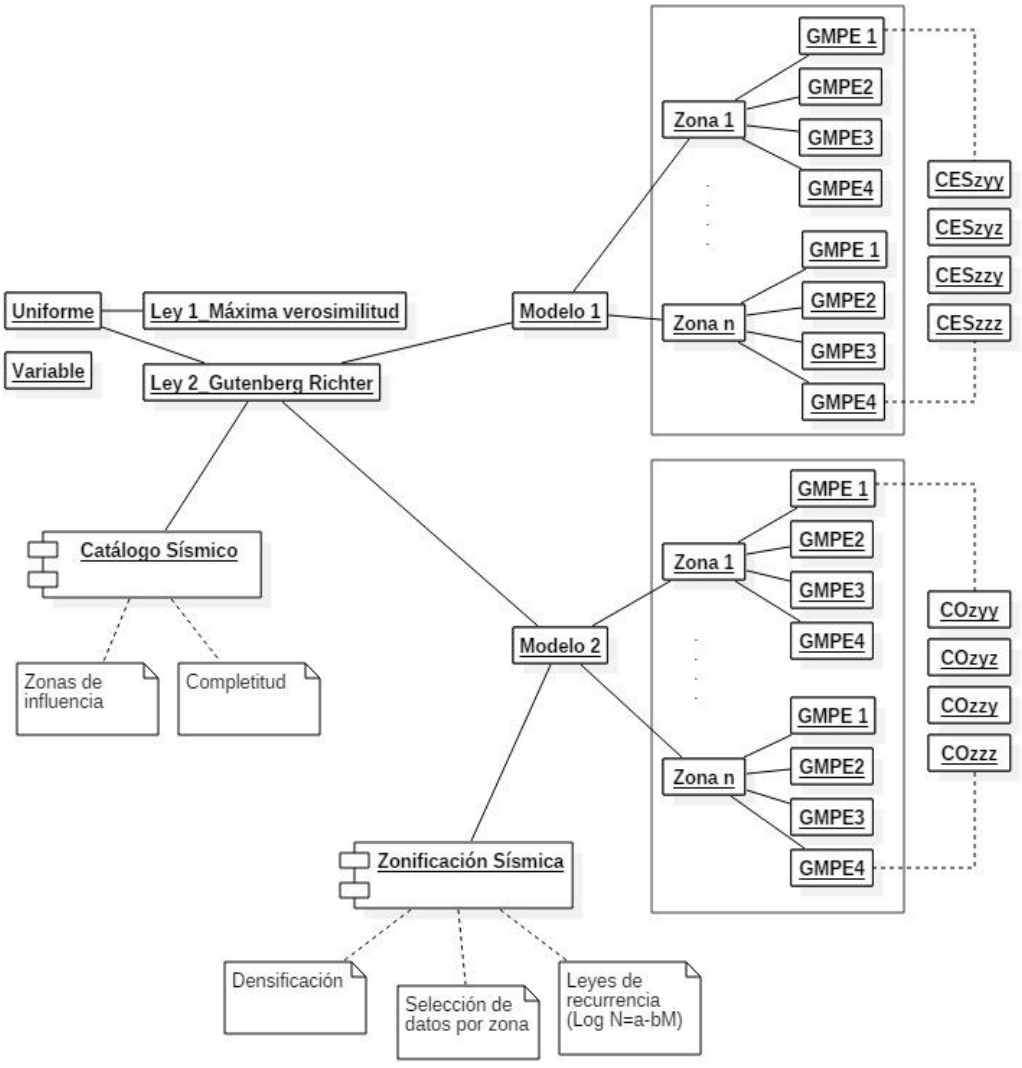


Ilustración 15: Zonas de amenaza sísmica Colombia. Fuente: (NSR 10, 2010).
Fuente: Elaboración propia.

Análisis de los Modelos

Selección de la mejor combinación por análisis estadístico *(Ver tabla 12)*.

Tabla 12: Comparación estadística de los modelos.

Nº	MODELO	MIN	MAX	MEDIA	DESV. ESTANDAR	VARIANZA
1	CESZYY	0	1659.88	1304.17	302.47	91488.21
2	CESZYZ	0	1309.58	1028.97	238.63	56944.38
3	CESZZY	0	1719.32	1350.91	313.29	98152.4
4	CESZZZ	0	754.67	702.75	8.16	66.53
5	COZYY	0	4.13	3.25	0.75	0.57
6	COZYZ	0	1.71118414	1.34442686	0.311834085	0.1
7	COZZY	0	4.14241505	3.25474672	0.754836103	0.57
8	COZZZ	0	1.87887371	1.47619614	0.342386867	0.12

Fuente: Elaboración propia.

4.1.6. Desagregación de la Amenaza o Peligrosidad

Como resultado de la determinación de la peligrosidad sísmica, aparte de lograr obtener los mapas interpolados a partir de los krigeados (método de interpolación geoestadístico), se obtuvieron las curvas de peligrosidad, las cuales presentan probabilidades de excedencia para los diferentes niveles de movimiento (periodos) en cada punto de interés en cualquiera de las zonas sismo-genéticas pertenecientes al área de influencia. Esta curva integra la influencia que presenta cada una de las zonas sismo-genéticas en el movimiento esperado en el emplazamiento.

El principal problema que se presenta es que en el proceso no se logra dar información específica sobre las características del sismo que presenta la mayor probabilidad de excedencia para el emplazamiento analizado, a esto se le denomina sismo de control para un periodo espectral. Para determinar dichas características se debe definir los valores combinados de magnitud y distancia (m, r) que presentan una mayor contribución en la peligrosidad; esto es posible a partir de la descomposición de la peligrosidad en contribuciones parciales; en función de dicha dupla también llamada desagregación de la peligrosidad, asociando los valores más altos de esta descomposición con el sismo de control.

La desagregación de la amenaza es un proceso relevante para el proyecto, primordialmente porque permite la determinación del sismo de control utilizando los resultados analizados de la estimación de peligrosidad; es decir optamos por manejar el modelo de atenuación COZYZ para los valores de aceleración espectral de PGA, y las aceleraciones de SA (0.1s) y SA (1s), con el fin de identificar aquellos sismos que contribuyen ampliamente al corto y largo periodo de movimiento.

A continuación, se muestran los resultados de la desagregación de la amenaza o peligrosidad para los valores de aceleración PGA, 1.0 segundos tanto para el periodo de retorno 475 y 975 años *(Ver ilustración 16, 17, 18, 19)*. De aquí es posible determinar la terna de valores que corresponden al sismo de control del proyecto (Magnitud, distancia radial, precisión) [M, R, ε], teniendo en cuenta que el valor ε no se toma un valor para este proceso, porque este es definido por el desarrollador.

DESAGREGACIÓN DE LA PELIGROSIDAD T – PGA

Las *ilustraciones 16 y 17* hacen referencia a los modelos de desagregación para los valores de aceleración espectral del periodo PGA, en donde se evidencia una similitud en el comportamiento de los valores de probabilidad. Sin embargo, su variación principal se da en que los valores en la tasa de retorno 975 es considerablemente menor 0.004 en comparación de 475 de 0.008; esto quiere decir que la peligrosidad presenta una distribución constante en función de la tasa de retorno, aunque su probabilidad aumenta a medida que aumenta el tiempo en años de ocurrencia.

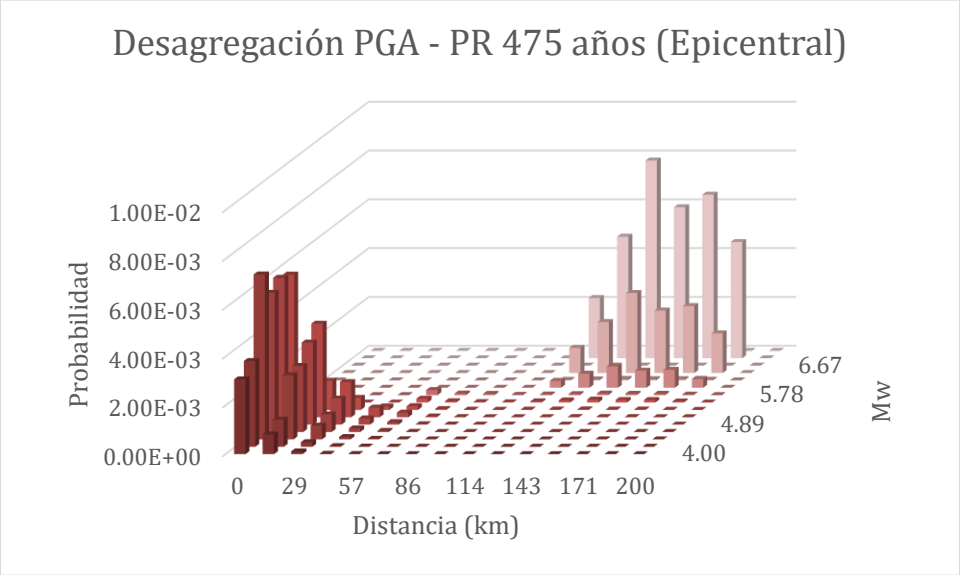


Ilustración 16: Desagregación del cálculo probabilístico para PGA con un periodo de retorno de 475 años. Fuente: elaboración propia.

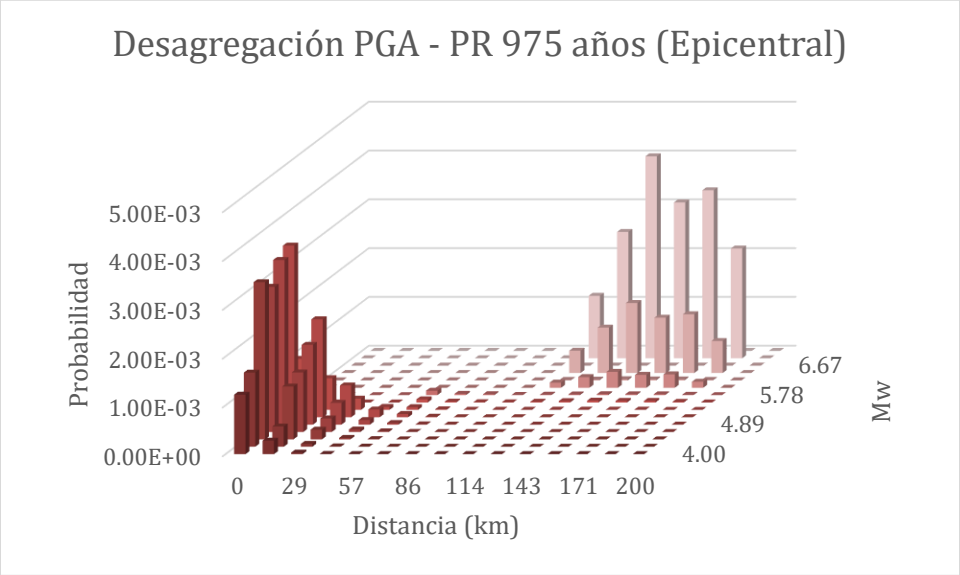


Ilustración 17: Desagregación del cálculo probabilístico para PGA con un periodo de retorno de 975 años. Fuente: elaboración propia.

DESAGREGACIÓN DE LA PELIGROSIDAD T - 1.0 Segundos

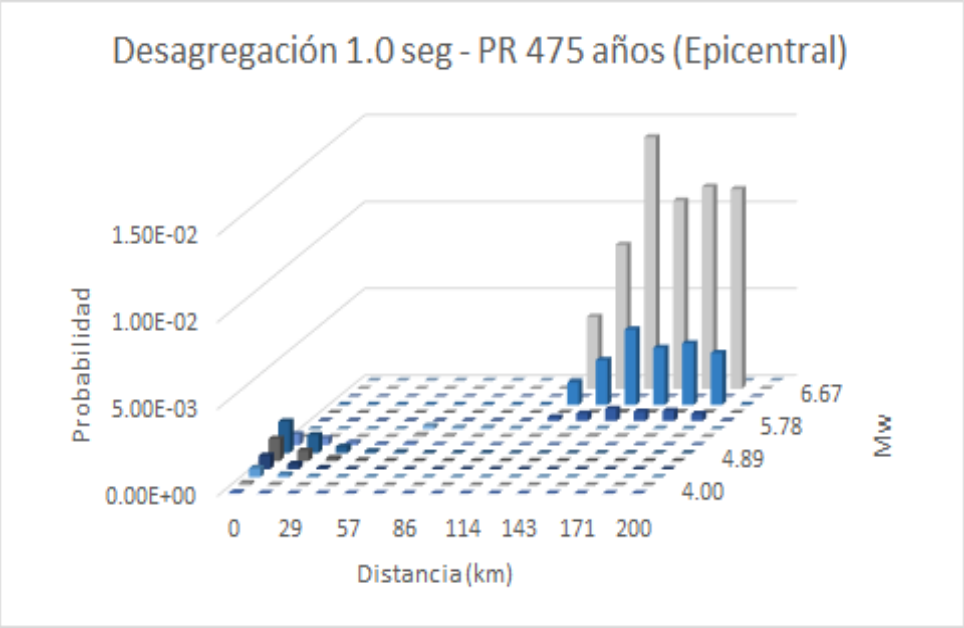


Ilustración 18: Desagregación del cálculo probabilístico para un periodo de 1.0 segundos con un periodo de retorno de 475 años.
Fuente: elaboración propia.

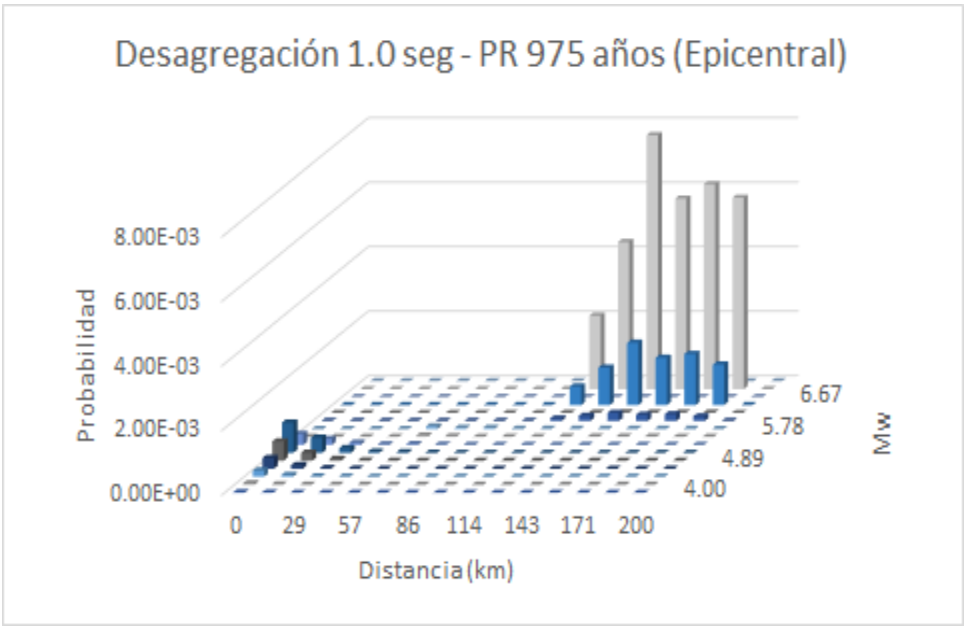


Ilustración 19: Desagregación del cálculo probabilístico para un periodo de 1.0 segundos con un periodo de retorno de 975 años.
Fuente: elaboración propia.

Las *ilustraciones 18 y 19* hacen referencia a los modelos de desagregación para los valores de aceleración espectral del periodo 1.0 segundos, en donde se evidencia una similitud en el comportamiento de los valores de probabilidad. Sin embargo, su variación principal se da en que

los valores en la tasa de retorno 975 es considerablemente menor 0.008 en comparación de 475 de 0.013. Es posible evidenciar que el comportamiento en comparación de los diferentes periodos de respuesta presente un incremento a partir de valor PGA y una disminución aproximada desde T - 1.0 segundo.

Una vez analizados y verificados los resultados de la desagregación, identificamos los sismos de control para cada uno de los periodos de retorno estudiados, el cual hace referencia al terremoto que presenta una mayor contribución a la peligrosidad de un emplazamiento y con un nivel de movimiento y profundidad particular.

Periodo de retorno 475 años *(Ver Tabla 13)*:

Tabla 13: Sismos de control por desagregación, tasa de retorno 475 años.

PERIODO DE RETORNO 475 AÑOS		
Ordenada Espectral	**Magnitud (Mw)**	**Distancia R (km)**
PGA	6.8 - 7.0	120 - 150
SA(1.0s)	6.6 - 7.0	120 -150

Fuente: Elaboración propia.

Periodo de retorno 975 años *(Ver Tabla 14)*:

Tabla 14: Sismos de control por desagregación, tasa de retorno 975 años.

PERIODO DE RETORNO 975 AÑOS		
Ordenada Espectral	**Magnitud (Mw)**	**Distancia R (km)**
PGA	6.5 - 7.0	120 - 150
SA(1.0s)	6.4 - 6.8	120 -150

Fuente: elaboración propia.

Por último, a partir de estos sismos de control fue necesario asociar estos sismos con las fuentes sísmicas potenciales de liberación de energía, permitiendo así identificar los escenarios sísmicos del proyecto.

4.1.7. Análisis de los Suelos y su Efecto Amplificador para la Ciudad de Bogotá D.C.

Para poder identificar el efecto local o de sitio se requiere reconocer la composición del suelo en el emplazamiento (Bogotá D.C), con el fin de determinar el comportamiento ante un movimiento sísmico. Los suelos poco consolidados por ejemplo los terrenos aluviales tienden a amplificar el movimiento, mientras que los terrenos compactos apenas lo mitigan o lo amplifican en menor cantidad. Para caracterizar el efecto local del movimiento esperado, se ha partido de mapas geológicos, geotécnicos y zonas de respuestas sísmicas de estudios de la Secretaría Distrital de Planeación junto con el Servicio Geológico Colombiano (Alcaldía mayor de Bogotá D.C, 2010).

En primera medida se obtiene el mapa de aceleración en roca en el emplazamiento más viable, es decir que su variabilidad de la intercepción de puntos sea mínima, luego se obtiene el mapa de zonas de respuesta sísmica de Bogotá y relacionando los factores de amplificación, se estableció una correspondencia entre los tipos de suelos encontrados en Bogotá con los correspondientes a la

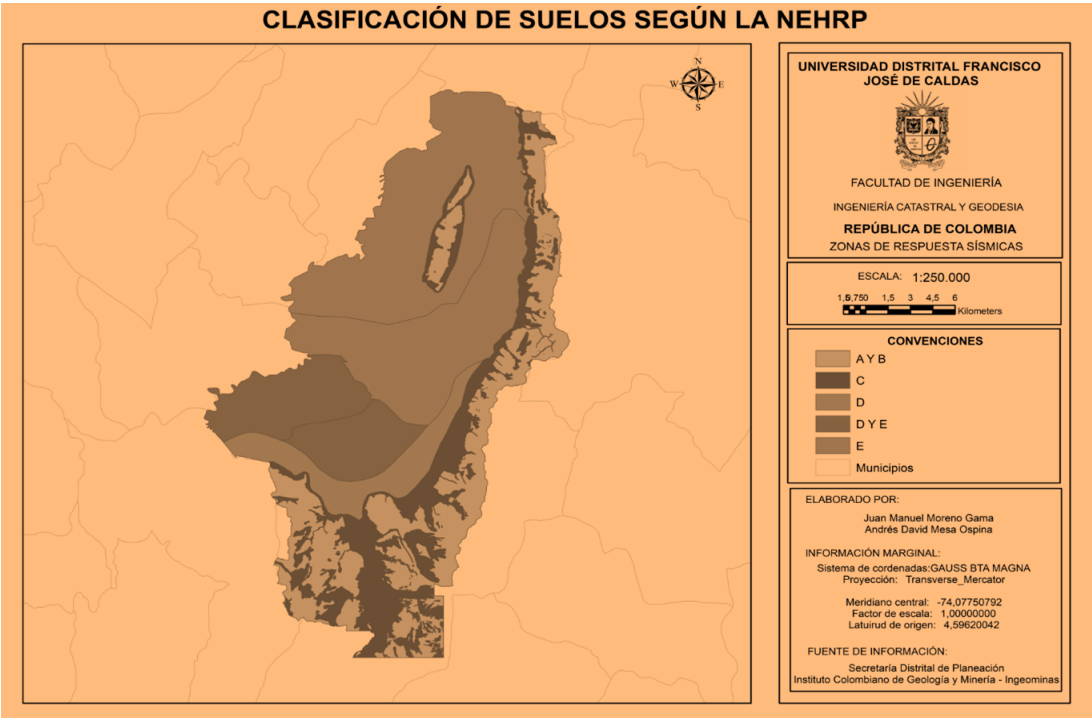
clasificación del NEHRP (National Earthquake Hazards Reduction Program). Esta diferencia cinco tipos de suelo, asignando a cada uno un factor de amplificación. Estos factores de amplificación definen el llamado efecto local o efecto de sitio, que se deberá superponer a las aceleraciones estimadas en condiciones de roca, para dar como resultado aceleraciones más realistas incluyendo el comportamiento de cada tipo de suelo sobre el movimiento sísmico. La clasificación de NEHRP *(Ver Tabla 15).*

Tabla 15: Clasificación de la NEHRP según el valor VS.

DESCRIPCIÓN GEOTÉCNICA	VALOR APROXIMADO Vs. (m/s)	CLASIFICACIÓN DE NEHRP 2009
Roca dura	>1500	A
Roca	760 < Vs30 < 1500	B
Suelo denso y roca suave	360 < Vs30 < 760	C
Suelos no cohesivos	180 < Vs30 < 360	D
Suelo blando	< 180	E
Requiere evaluación específica	-	F

Fuente: NEHRP, 2009.

Las características geotécnicas deben tenerse en cuenta asignando al suelo bajo la cimentación una determinada clase, en función de la velocidad de ondas de cizalla en los 30 primeros m de espesor (Vs30). La NEHRP establece una clasificación en 6 tipos, del A al F, el último de los cuales requiere una evaluación de la respuesta dinámica. Los espectros de respuesta de cada sitio se establecen, por tanto, en función de la zona sísmica donde se ubique el emplazamiento y la clase de suelo que se asigne *(Ver Mapa 9).*



Mapa 9: Clasificación de suelos de Bogotá según la NEHRP.
Fuente: Elaboración propia.

Se puede identificar que en la parte noroccidental se encuentra la zona la cual se observa mayor amplificación y en la parte central es la que más compacto está el suelo con consecuencia su amplificación es menor.

4.1.8. Factores de Amplificación Según NERPH y NSR10.

Una vez definidos los diferentes tipos de suelo presentes del emplazamiento a través del estudio edafológico y la macro zonificación sísmica, es necesario conocer la clasificación de los mismos según los factores de amplificación o de-amplificación propios de los diferentes suelos de la región.

Para ello fue necesario desarrollar un estudio general sobre la diferente normatividad existente para Colombia NSR-10, los cuales se equiparán con los factores definidos por la NEHRP en el año 2009 tanto para corto como para largo periodo. Por lo que a continuación presentaremos aquellos valores cuantificados en las normativas y que fueron implementadas para lograr desarrollar el efecto local del proyecto, entre ellas identificamos los factores para la aceleración pico PGA como para las aceleraciones de corto y largo periodo SA (0.1s) y SA(1.0s) *(Ver Ilustración 20, 21, 22)*. Cabe resaltar que para poder aplicarlos es necesario contar con el movimiento de entrada, teniendo en cuenta la no linealidad entre el tipo de suelo, su dureza y movimientos débiles o fuertes.

Tabla 16: Factores de amplificación según el PGA y la clasificación de suelos de la NERHP.

SITE	MAPPED MCE GEOMETRIC MEAN PEAK GROUND ACCELERATION, PGA				
CLASE	**PGA<=0.1**	**PGA=0.2**	**PGA=0.3**	**PGA=0.4**	**PGA>=0.5**
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
E	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9

Fuente: NEHRP, 2009.

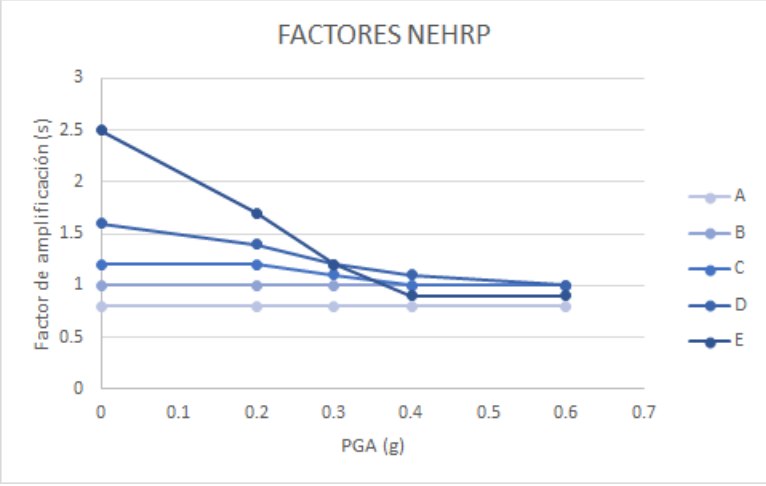


Ilustración 20: Factores de amplificación según el PGA y la clasificación de suelos de la NEHRP.
Fuente: elaboración propia.

En la *tabla 16* podemos evidenciar que en la NEHRP tiene los valores de clasificación del suelo según la aceleración pico PGA en los que se puede evidenciar que los suelos E son los suelos que generan la mayor amplificación de la onda sísmica, que en la zona de emplazamiento tiene mayor área de cubrimiento, además, los suelos A son los suelos que generan mayor atenuación al ser el único tipo de suelo que presenta una deamplificación de la aceleración del suelo.

Tabla 17: Factores de amplificación según el Ss. y la clasificación de suelos de la NERHP.

SITE	MAPPED MCE GEOMETRIC MEAN PEAK GROUND ACCELERATION, PGA				
CLASE	**Ss.<=0.25**	**Ss.=0.5**	**Ss.=0.75**	**Ss.=1.0**	**Ss.>=1.25**
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
E	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9

Fuente: NEHRP, 2009.

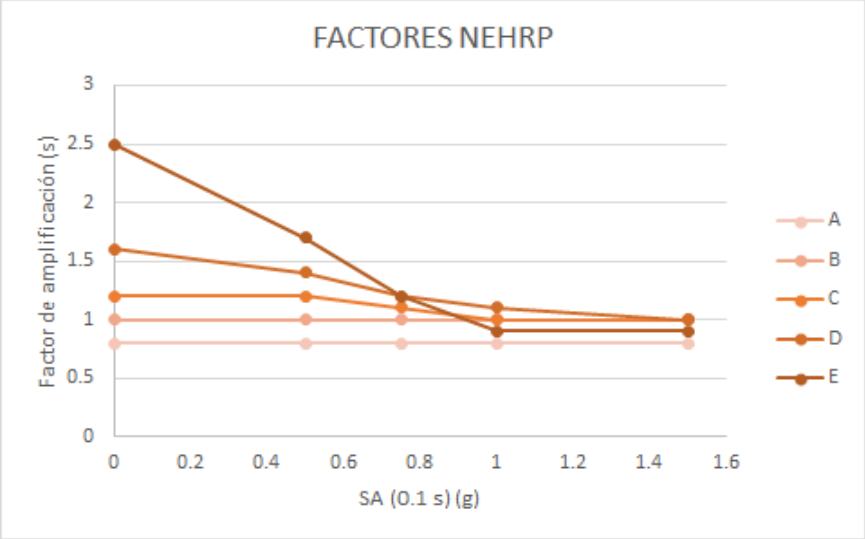


Ilustración 21: Factores de amplificación según el S.s. y la clasificación de suelos de la NEHRP.
Fuente: elaboración propia.

Según la *ilustración 21* es posible identificar que los valores de atenuación expresados para el PGA, presenta los mismos factores de atenuación para los valores con aceleración espectral entre 0.25 y 1.25 segundos dando a entender que las características físicas para estos periodos suelen ser similares. Por otro lado, es posible evidenciar que los suelos de tipo B se mantienen constantes, por lo que logran tener una variación según el efecto local del suelo.

Tabla 18: Factores de amplificación según el S1. y la clasificación de suelos de la NEHRP.

SITE	MAPPED MCE GEOMETRIC MEAN PEAK GROUND ACCELERATION, PGA				
CLASE	**S1<=0.1**	**S1=0.2**	**S1=0.3**	**S1=0.4**	**S1>=0.5**
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
D	2.4	2.0	1.8	1.6	1.5
E	3.5	3.2	2.8	2.4	2.4

Fuente: NEHRP, 2009.

A diferencia de las imágenes anteriores, la *ilustración 22* que muestra los factores de atenuación para las aceleraciones espectrales SI, encontramos un comportamiento de la atenuación mucho más suavizadas en comparación con las mencionadas anteriormente, además de expresar el mismo comportamiento para los suelos A y B en conceptos de atenuación y una variabilidad controlada en los suelos D y E.

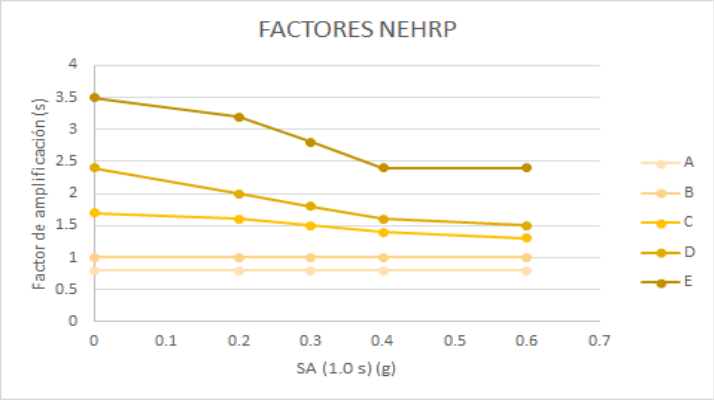


Ilustración 22: Factores de amplificación según el S1. y la clasificación de suelos de la NEHRP.
Fuente: elaboración propia.

4.1.9. Caracterización del Efecto Local.

Una vez definidos los factores de amplificación o de-amplificación implementados en el proyecto, es necesario transformar los resultados del cálculo de la peligrosidad en roca combinando estos con la clasificación de los suelos obtenido mediante el análisis geotécnico y la microzonificación sísmica, aplicando los factores para cada clase. Este proceso se desarrolla a partir de la siguiente expresión, en el cual el factor de amplificación altera la aceleración espectral de manera directa, es decir es un peso asociado al tipo de suelo que presenta un rango [0,1]:

$$SA(s) = FA\,(s)\,.SA\,(r) \tag{38}$$

Es importante tener en cuenta que el valor del periodo PGA hace referencia a la aceleración espectral para T = 0.0 s. Obteniendo como resultados los mapas de aceleración espectral incluyendo el efecto local, por lo que hasta este punto finalizamos con la caracterización de la peligrosidad para el emplazamiento de estudio; Bogotá D.C.

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS Y RESULTADOS

Como se ha mencionado a lo largo de este escrito, los resultados obtenidos a partir del cálculo de la amenaza sísmica permiten desarrollar la caracterización del movimiento esperado por sismos futuros, esto asociado directamente con una probabilidad de excedencia del movimiento y una varianza asociada a los mapas de isolíneas con el cual se generó el mapa de peligrosidad; este asociado con cada periodo de retorno estudiado. A continuación, se muestra parte de los resultados obtenidos en el proceso con la finalidad de lograr caracterizar completamente el movimiento, esto demostrará tanto los emplazamientos genéricos en roca como para el efecto local de la microzonificación sísmica de la ciudad.

- Mapas de peligrosidad sísmica del movimiento esperado del 10% en 50 años (Periodo de retorno de 475 años), en términos de las siguientes aceleraciones: PGA y espectrales de corto periodo SA (0.1 s) y largo periodo SA (1.0 s).

- Mapas de peligrosidad sísmica del movimiento esperado del 5% en 50 años (Periodo de retorno de 975 años), en términos de las siguientes aceleraciones: PGA y espectrales de corto periodo SA (0.1 s) y largo periodo SA (1.0 s).

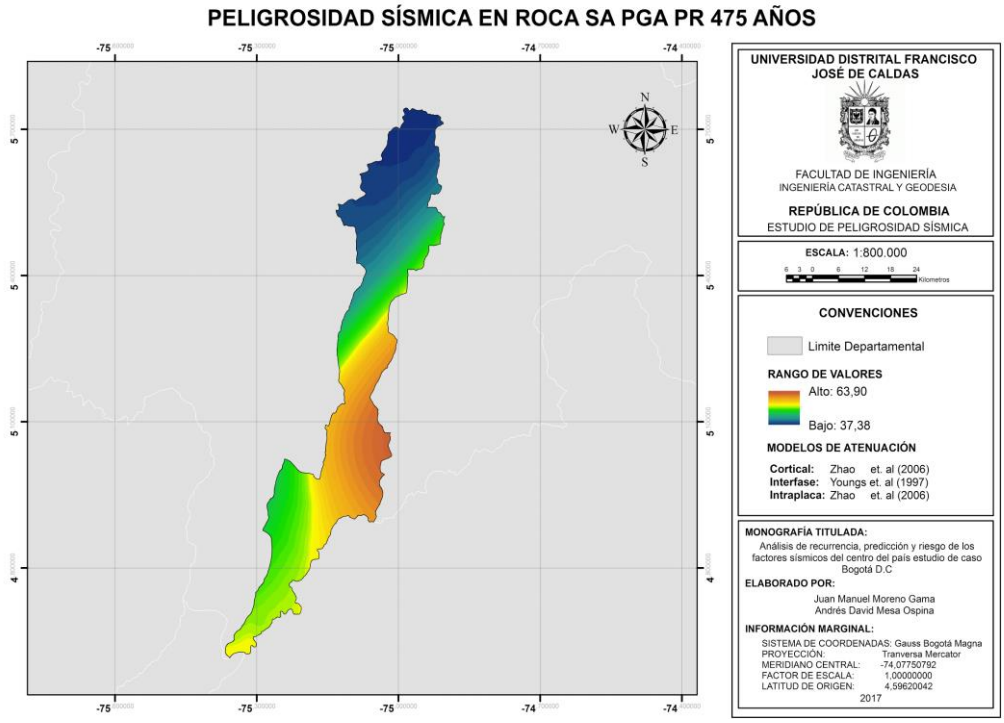
- Espectros de amenaza en los diferentes suelos encontrados en la ciudad de Bogotá, para periodos de retorno de 475 y 975 años.

5.1. MAPAS DE ACELERACIÓN EN ROCA.

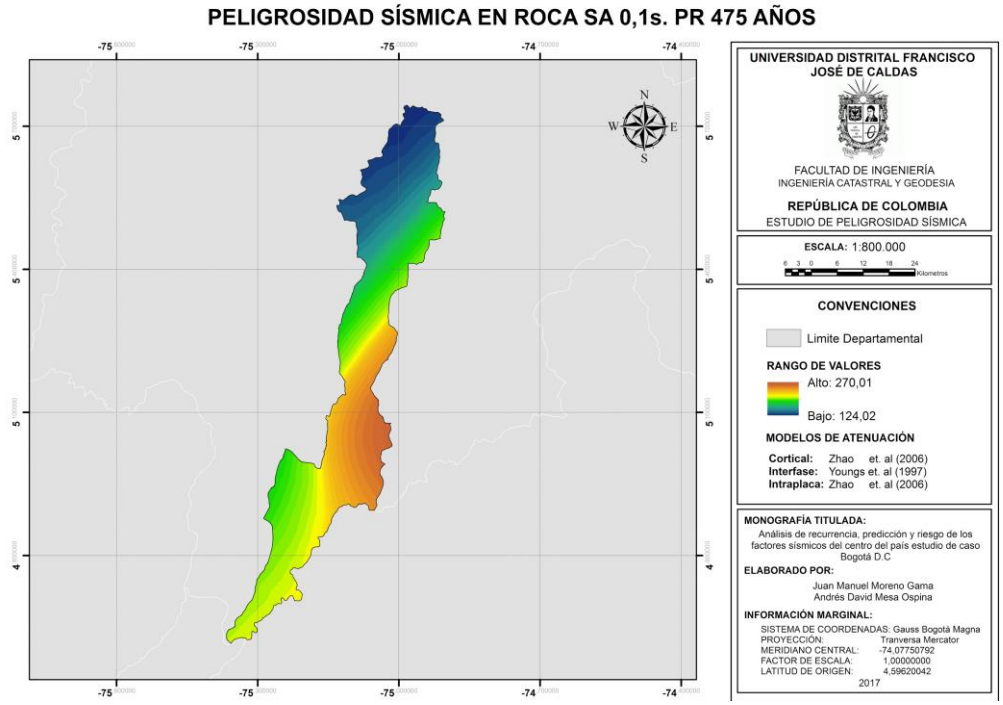
A continuación, se muestra un conjunto de mapas, los que muestran el resultado de la estimación de la peligrosidad sísmica de Bogotá para la aceleración pico PGA, y aceleraciones espectrales SA(0.1s) y SA(1.0s) obtenidas tanto para un periodo de retorno de 475 años *(Ver Mapa 10, 11, 12)*, como para un periodo de retorno de 975 años, teniendo en cuenta que todos u cada uno de ellos representan condiciones de suelo duro o roca *(Ver Mapa 13, 14, 15).*

Estos mapas se desarrollaron a partir de las interpolaciones de la malla de puntos planteadas en CRISIS, los cuales estiman la peligrosidad de n puntos dentro de la zona de estudio. Cabe resaltar que para cada uno de estos mapas se desarrollaron mapas de isolíneas, los cuales permiten estimar en toda la superficie el valor de peligrosidad a partir de dichos puntos. Por otro lado, es importante mencionar que estas interpolaciones se desarrollaron tanto para la zonificación espacial como para la temporal, en donde se evidencia la generación de extrapolaciones indeseadas en Bogotá D.C para el caso de la zonificación espacial generando problemas en la predicción de la peligrosidad ya que estas no presentan el nivel de confianza necesario para adoptarlo en el análisis. Sin embargo, la metodología con la zonificación temporal (GEM) presenta interpolaciones óptimas y con una desviación estándar considerablemente baja.

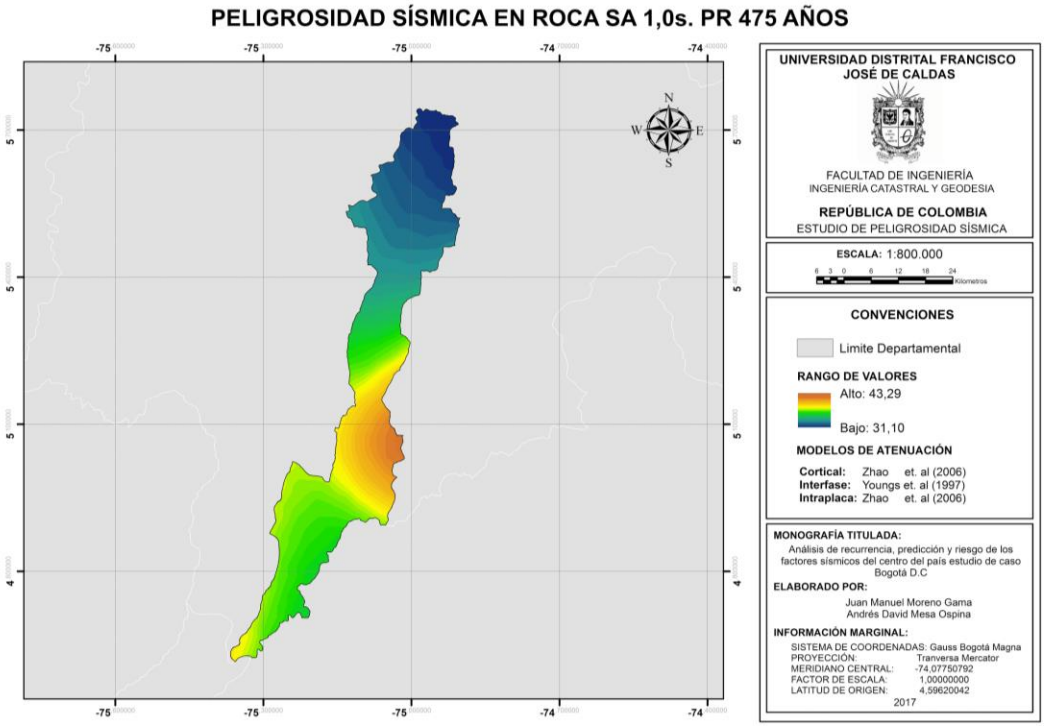
MAPAS EN ROCA CON UN PERIODO DE RETORNO DE 475 AÑOS



Mapa 10: Peligrosidad sísmica en roca con aceleración espectral PGA y periodo de retorno de 475 años. Fuente: Elaboración propia.

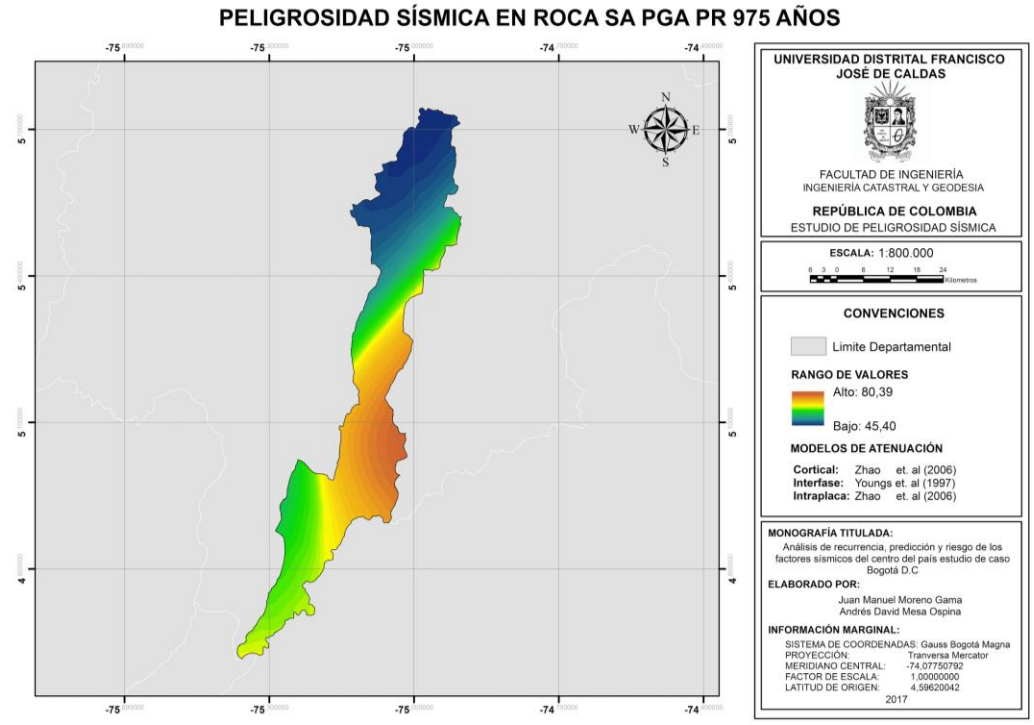


Mapa 11: Peligrosidad sísmica en roca con aceleración espectral 0,1 segundos y periodo de retorno de 475 años. Fuente: Elaboración propia.

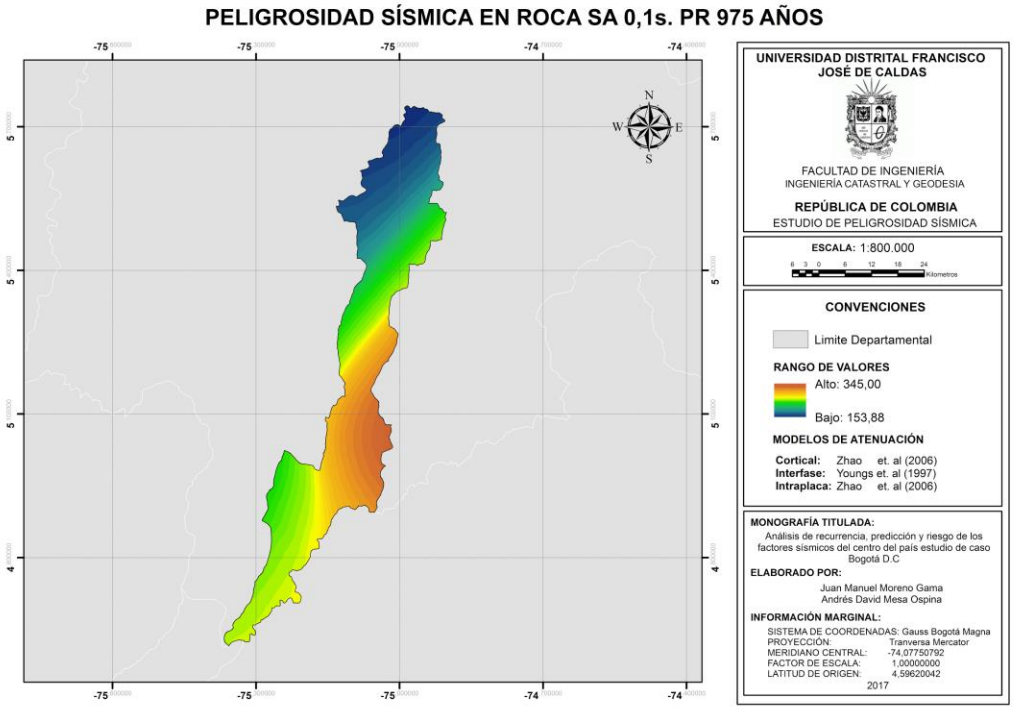


Mapa 12: Peligrosidad sísmica en roca con aceleración espectral 1,0 segundos y periodo de retorno de 475 años. Fuente: Elaboración propia.

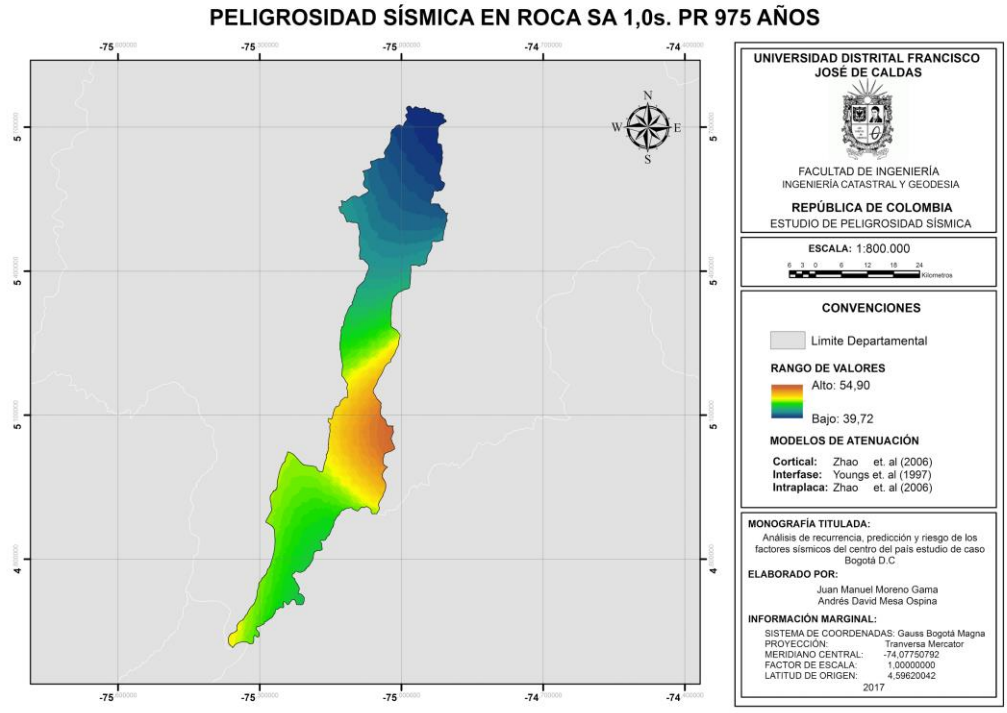
MAPAS EN ROCA CON UN PERIODO DE RETORNO DE 975 AÑOS



Mapa 13: Peligrosidad sísmica en roca con aceleración espectral PGA y periodo de retorno de 975 años. Fuente: Elaboración propia.



Mapa 14: Peligrosidad sísmica en roca con aceleración espectral 0,1 segundos y periodo de retorno de 975 años. Fuente: Elaboración propia.



Mapa 15: Peligrosidad sísmica en roca con aceleración espectral 1,0 segundos y periodo de retorno de 975 años. Fuente: Elaboración propia.

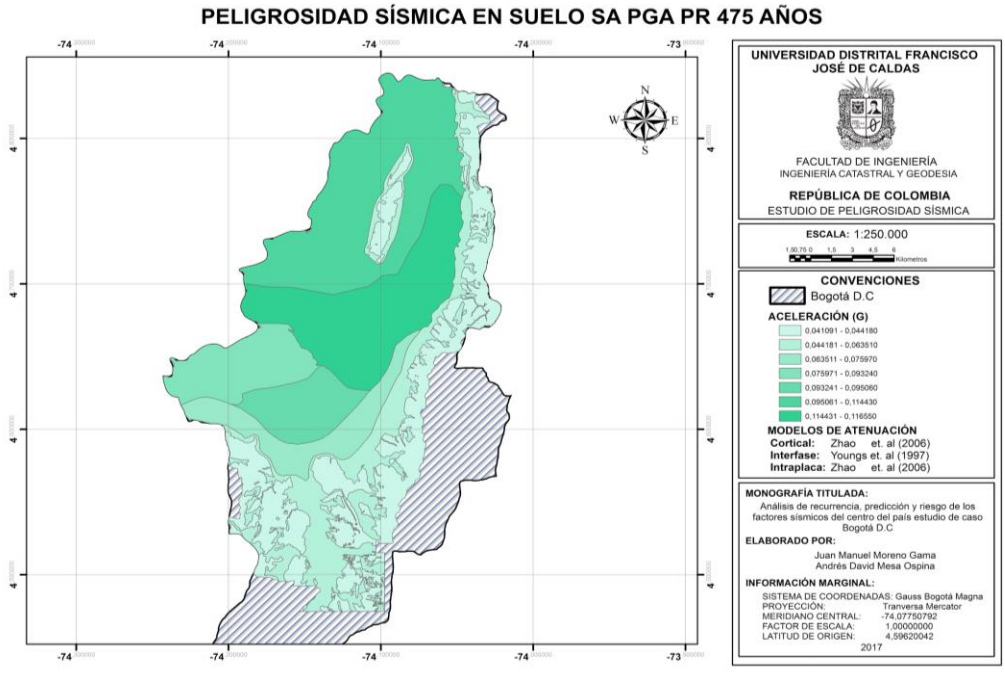
Los mapas de peligrosidad expuestos anteriormente presentan la estimación de la peligrosidad para diferentes valores de aceleración espectral, además de presentarse dos valores de retorno distintos. En los cuales la principal diferencia entre los mapas con diferente tasa de retorno y el mismo valor de periodo es que espacialmente los mapas de isolíneas presentan el mismo comportamiento, sin embargo, los valores de probabilidad asociados a los mismos varían considerablemente, en donde la probabilidad de ocurrencia de un sismo aumenta proporcionalmente en función de la tasa de retorno.

Mientras que los mapas de diferente periodo y mismo valor de tasa de retorno, la malla kriging muestra una focalización en la zona central del mapa, tal y como se muestra en las *ilustraciones 12 y 15*, en donde podemos decir que las variaciones de peligrosidad aumentan en dicha zona sin tener cuenta las características intrínsecas del suelo.

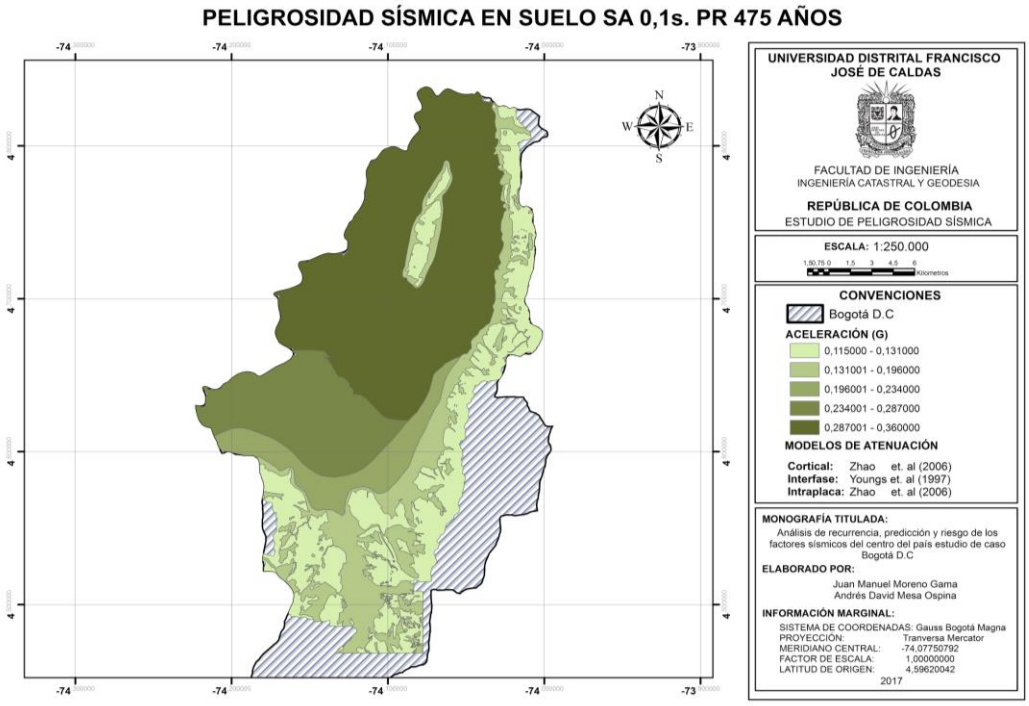
5.2. MAPAS DE ACELERACIÓN CON EFECTO LOCAL ASOCIADO.

Para la obtención de los mapas de aceleración con efecto local asociado al suelo de Bogotá, se emplearon principalmente los resultados de los mapas de peligrosidad en roca, la clasificación de los suelos para la ciudad de Bogotá y los valores de amplificación correspondientes para cada uno de los suelos; tal y como se mencionó con anterioridad, se obtuvieron mapas de peligrosidad que incluyen el efecto local o de sitio para cada lugar de la ciudad. Como en el numeral 5.1, se anexan el conjunto de mapas para la aceleración pico PGA, y las aceleraciones espectrales de corto y largo periodo SA (0.1s) - SA (1.0s) y los periodos de retorno de 475 *(Ver Mapa 16, 17, 18)* y 975 años *(Ver Mapa 19, 20, 21).*

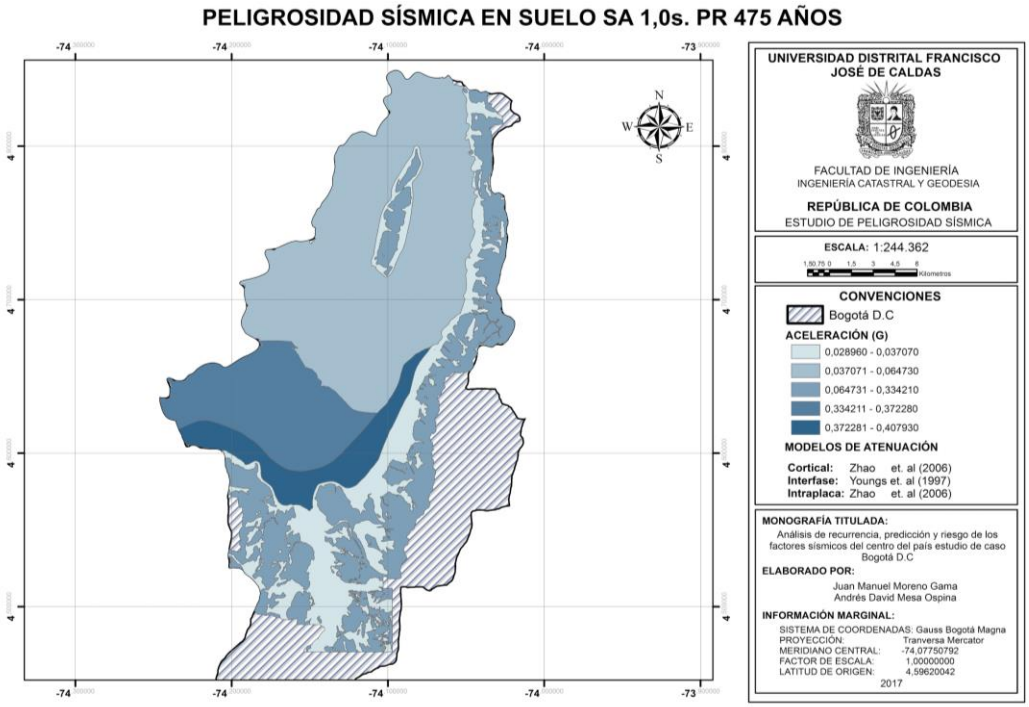
MAPAS EN SUELO CON UN PERIODO DE RETORNO DE 475 AÑOS



Mapa 16: Peligrosidad sísmica en suelo con aceleración espectral PGA y periodo de retorno de 475 años. Fuente: Elaboración propia.



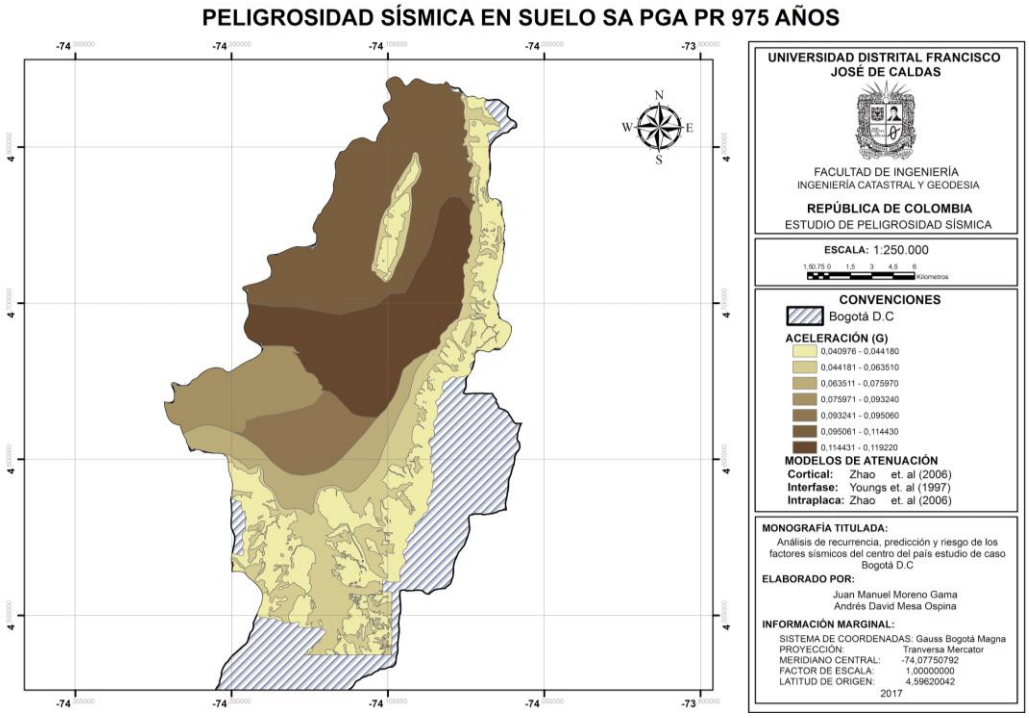
Mapa 17: Peligrosidad sísmica en suelo con aceleración espectral 0,1 segundos y periodo de retorno de 475 años. Fuente: Elaboración propia.



Mapa 18: Peligrosidad sísmica en suelo con aceleración espectral 1,0 segundos y periodo de retorno de 475 años. Fuente: Elaboración propia.

En los *mapas 16, 17, 18*, es posible visualizar las variaciones causadas por el efecto local con respecto a los mapas de peligrosidad en roca para una tasa de retorno de 475 años, los cuales no modifican en su totalidad los valores de los mapas de isolíneas originales, pero si se diversifican en función del tipo de suelo analizado, por lo que la atenuación se verá principalmente en los suelos rocosos (zona montañosa), mientras que la amplificación se ve dada en suelos lacustres (zona noroccidental).

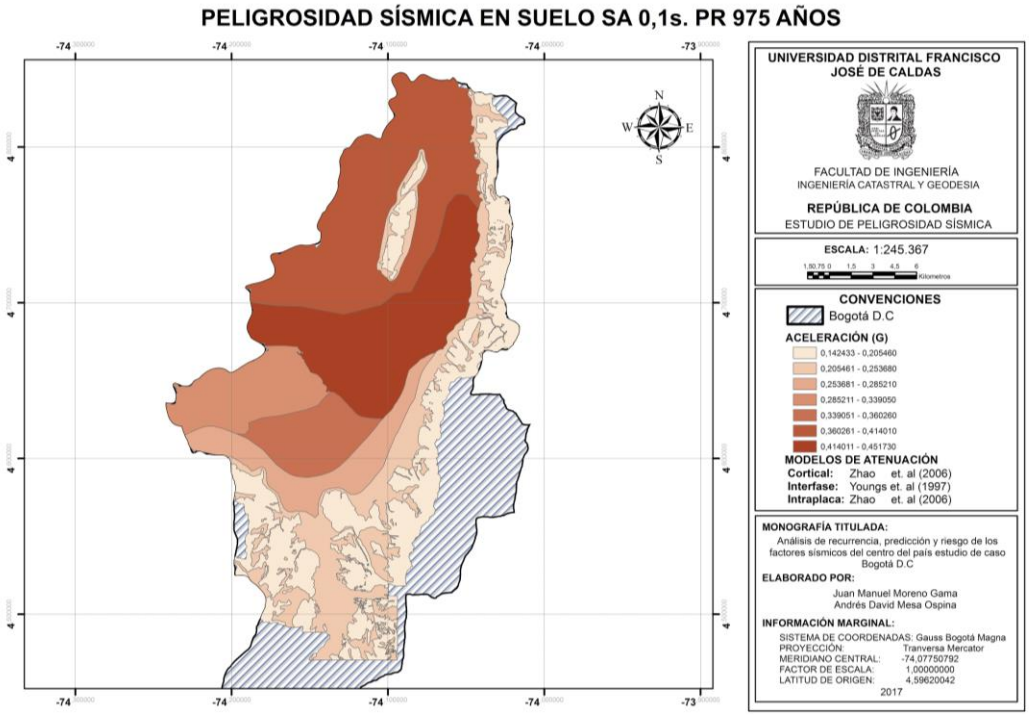
MAPAS EN ROCA CON UN PERIODO DE RETORNO DE 975 AÑOS



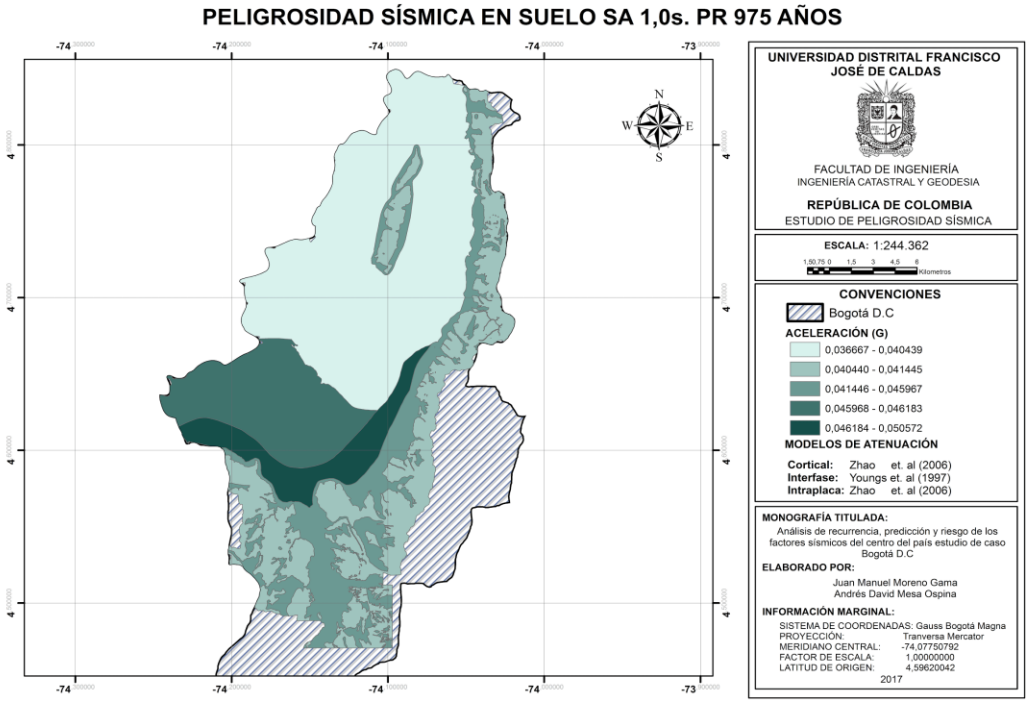
Mapa 19: Peligrosidad sísmica en suelo con aceleración espectral PGA y periodo de retorno de 975 años. Fuente: Elaboración propia.

El factor más relevante para tener en cuenta en estos mapas es la función que presentan los suelos para concentrar la energía en un área en particular, tal como lo es el suelo lacustre el cual actúa como condensador y maximizador de la energía, traduciéndose esto en un posible aumento en el daño ocasionado ante la ocurrencia de un sismo. Caso contrarío en el suelo rocoso, en el cual se deberían concentrar la mayoría de las edificaciones (de ser posible) ya que presentan las mejores características sismo resistentes lo cual se evidencia al presentar los valores más bajos de aceleración en cada uno de los mapas mostrados.

Cabe destacar, que estos mapas presentan el sustento fundamental para el desarrollo de los espectros sísmicos de respuesta ante el evento sísmico tal y como se muestra a continuación, y que su variación entre las diferentes tasas de retorno se centra en el aumento proporcional de la probabilidad de ocurrencia del sismo, por lo que es de esperar que los espectros presenten variaciones en función de esta variable tan significativa para la estimación de la peligrosidad.



Mapa 20: Peligrosidad sísmica en suelo con aceleración espectral 0,1 segundos y periodo de retorno de 975 años. Fuente: Elaboración propia.

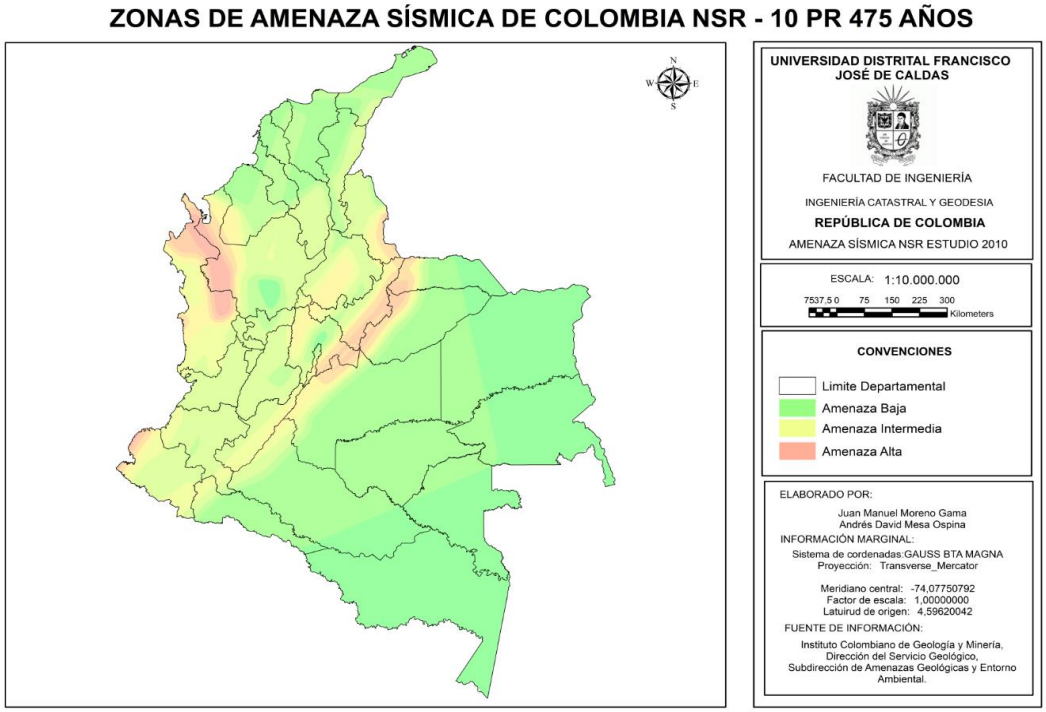


Mapa 21: Peligrosidad sísmica en suelo con aceleración espectral PGA y periodo de retorno de 975 años. Fuente: Elaboración propia.

5.3. ESPECTROS RESULTANTES.

5.3.1. Espectros según la norma sismo resistente colombiana NSR-10.

La norma colombiana de diseño sismo resistentes NSR (2010) establece las especificaciones para las condiciones mínimas de las construcciones ante la respuesta estructural durante un sismo, teniendo en cuenta un espectro de respuesta de aceleraciones. Este se define partiendo de un mapa de amenaza del que se deducen los valores de aceleración en roca, que se combinan con una forma espectral y con los factores de amplificación indicados dependiendo del tipo de suelo. El mapa de zonificación sísmica de la NSR-10 divide al territorio nacional en tres zonas, de amenaza sísmica baja, amenaza sísmica intermedia y amenaza sísmica alta. Las aceleraciones pico efectivas son menores o iguales a 0.10 g, entre 0.10 y 0.20 g y mayores a 0.20g, respectivamente, además el periodo de retorno para la norma es de 475 años *(Ver Mapa 21)*.



Mapa 22: Zonas de amenaza sísmica en Colombia según la NRS – 10 con un periodo de retorno de 475 años. Fuente: Elaboración propia.

En el emplazamiento, la zona sísmica en la que está ubicada Bogotá D.C es la zona de amenaza intermedia, cuya aceleración pico efectiva es 0.20 g. Las clases de suelo presentes en la ciudad son las correspondientes a suelos tipo A, B, C, D y E, donde se puede identificar la dominancia de suelos E el que amplifica en gran cantidad un sismo, es por ello que dentro de la NSR -10 se busca generar unas series de requisitos para la construcción en Colombia, teniendo en cuenta un espectro de diseño para un coeficiente de amortiguamiento igual al 5 % del crítico con base al Decreto 193 de 2006 para periodos estructurantes con base rígida menores a 2.5 segundos el espectro de diseño suavizado superficial depende de la zona de ubicación no puede ser menor al espectro mínimo de

diseño *(Ver Ilustración 23).* Lo anterior se evidencia en la *Tabla 19* mediante los coeficientes espectrales de diseño por localización.

Tabla 19: Coeficientes espectrales de diseño para un coeficiente de amortiguamiento igual al 5% del crítico.

	ZONA 1 CERROS	ZONA2 PIEDEMONTE	ZONA 3A Y 3B LACUSTRE A	ZONA 4 LACUSTRE B	ZONA 5A Y 5B TERRAZAS
To	0.20	0.20	0.50	0.50	0.50
Tc	1.00	1.20	3.00	3.00	3.00
Tl	5.00	6.00	5.71	5.71	5.71
Am	0.24	0.30	0.25	0.16	0.20
An	0.30	0.40	0.30	0.20	0.30
Fa	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Fv	2.00	2.25	32.48	31.18	25.98

Fuente: Decreto 193 de 2006, Alcaldía Mayor de Bogotá.

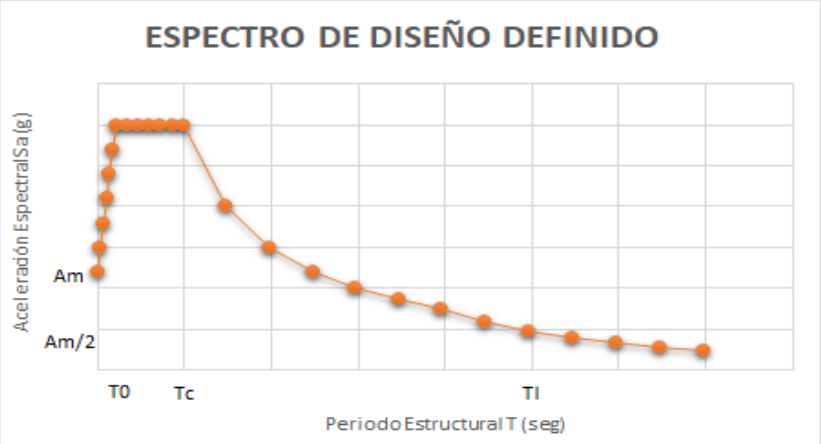


Ilustración 23: Definición del espectro de diseño respecto a sus coeficientes.
Fuente: Decreto 193 de 2006, Alcaldía Mayor de Bogotá.

5.3.2. Comparación de los espectros UHS del proyecto y espectros NSR-10.

En la *Ilustración 24*, se evidencia los espectros de diseño definidos para un coeficiente de amortiguamiento respecto al crítico de 5 %, el cual está establecido en la Norma de Sismo Resistencia de 2010, el cual rige actualmente para la ciudad de Bogotá D.C. Cabe resaltar que las aceleraciones espectrales están reseñadas sus fórmulas y sus valores espacializados en 5 zonas (Cerros, Piedemonte, Lacustre A, Lacustre B y Terrazas) que fueron reformulados teniendo en cuenta los tipos de suelo de la NEHRP con una tasa de retorno a 475 años.

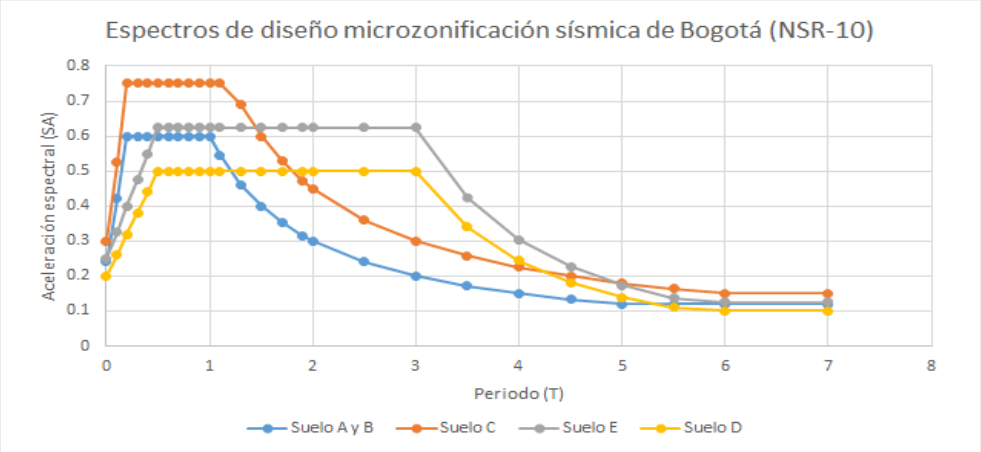


Ilustración 24: Espectros de diseño respecto a la microzonificación sísmica de Bogotá D.C.
Fuente: Elaboración propia.

En la *Ilustración 25* se exponen los espectros de aceleración de la clasificación de las 4 zonas establecidas y entrelazadas entre el decreto 193 de 2006 y la NEHRP, lo anterior teniendo en cuenta el estudio probabilista asociado a un periodo de retorno de 475 años, donde no se tiene considerado el modelo de atenuación estipulado dentro del efecto sitio de Bogotá D.C.

Estos espectros logran evidenciar las variaciones de respuesta ante el sismo en función del tipo de suelo y el periodo de oscilación de este, sin efecto sitio podemos concluir que suponiendo que toda la superficie de estudio es roca, se presenta un fenómeno inverso al esperado según las condiciones físicas del suelo, por ello es importante anexar las variaciones por la de-amplificación o amplificación del suelo según sus características intrínsecas.

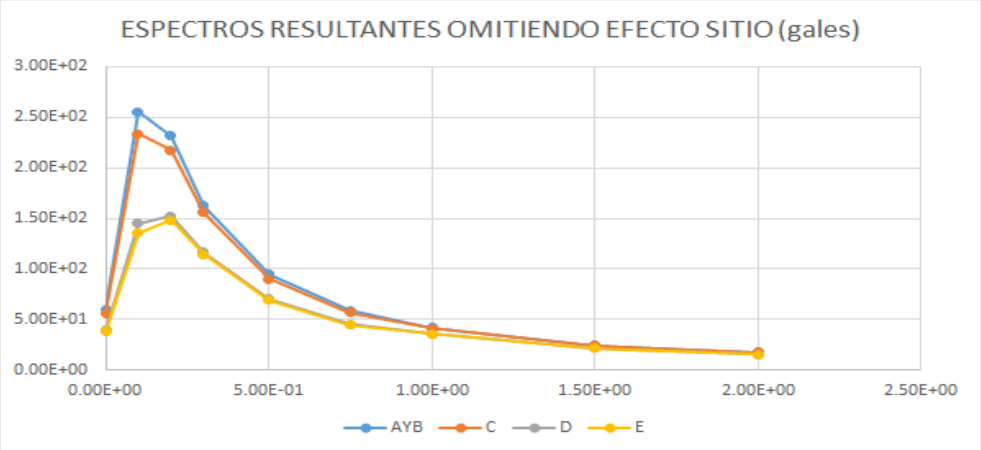


Ilustración 25: Espectros de respuesta omitiendo el efecto sitio.
Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente se presenta los espectros de respuesta obtenidos para cada clasificación de la zona de emplazamiento (la ciudad de Bogotá D.C), y el espectro atenuado según el tipo de suelo *(Ver Ilustración 26)*; en donde podemos observar que todos los suelos que no son roca, presentan un incremento en su valor de aceleración espectral, esto debido a la disminución de resistencia de los

suelos o a cerramientos de la onda sísmica en suelos húmedos. El suelo que mayor incremento presenta son los suelos lacustres A y B.

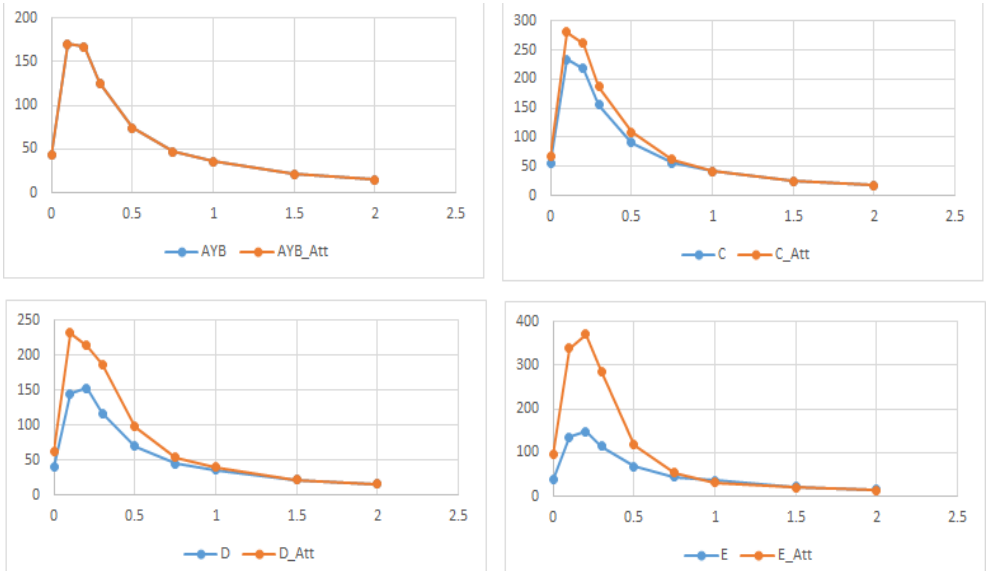


Ilustración 26: Espectro de respuesta atenuada y sin atenuar para cada clasificación del suelo de la zona de emplazamiento.
Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se muestran los espectros de respuesta críticos obtenidos para cada tipo de suelo de la zona de emplazamiento (la ciudad de Bogotá D.C), como resultado del estudio probabilista asociado al periodo de retorno de 475 años -que, a diferencia de la gráfica anterior, estos son comparados con el correspondiente espectro de la NSR-10 para cada tipo de suelo *(Ver Ilustración 27)*. En donde podemos evidenciar una variación amplia entre ellos, principalmente a causa de los criterios que pueden llevarse a cabo en función de nuestros valores respuesta, sin embargo, es posible identificar que basados en este estudio encontramos una sobre estimación por parte de la norma sismo resistente colombiana, en donde los factores de diseño sismo resistente de las viviendas supera los valores críticos del sismo identificado, a pesar de esto se evidenció una serie de características de la ciudad que pueden llegar a explicar este fenómeno.

- Los espectros de diseño responden a características no solamente de la peligrosidad, sino también del estado de conservación y estructura actual de la vivienda en la ciudad, por lo que sobrepasarse evidencia un incremento de gastos innecesarios para el desarrollo constructivo de la ciudad que de igual forma cubre la necesidad de protección ante un evento de este estilo.
- La extensión de la meseta en los espectros se debe a las necesidades de la ciudad por mantener la seguridad de algunos tipos de edificaciones que necesitan de un mayor control ante un evento sísmico, tal es el caso de los hospitales, industrias, centros comunales o de atención de desastres, centrales de energía, agua potable entre otros.

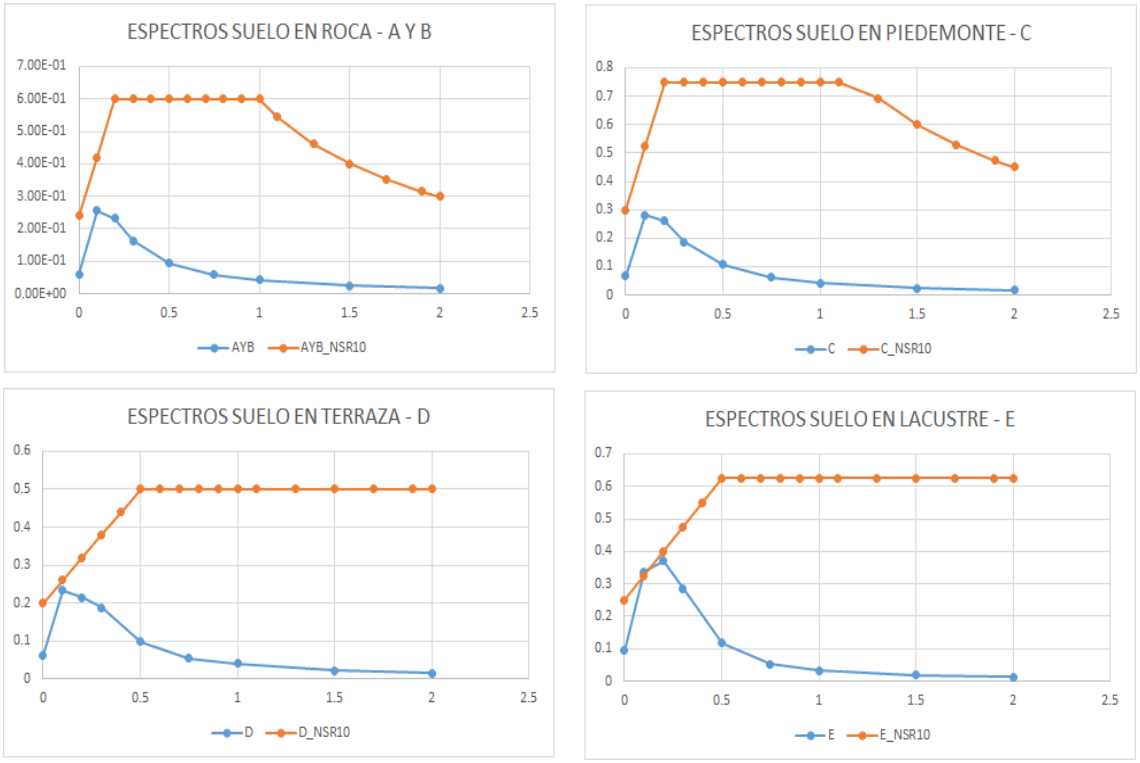


Ilustración 27: Relación entre los espectros de respuesta y los espectros de diseño.
Fuente: Elaboración propia.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. La metodología probabilística zonificada presenta una aproximación muy cercana en comparación con los estudios desarrollados por el Servicio Geológico Colombiano, lo cual se evidencia a través del análisis de los mapas de sismicidad y la cercanía con los valores de aceleración pico resultante de la caracterización de la peligrosidad. Evidenciando de esta forma que es una metodología que facilita el cálculo de la estimación al generalizar la información actual del país y asociar valores probabilísticos a la predicción, mientras que en la metodología determinista es necesario la manipulación de cada uno de los sismos históricos individualmente volviendo más complejo el cálculo de la peligrosidad.

2. La peligrosidad de la ciudad de Bogotá resultante del proyecto corresponde a un nivel intermedio, en donde se logró definir que el sismo control más probable para la ciudad ronda máximo los 7.0 Magnitud momento (Mw) y una profundidad de 150 km, además de presentar una ocurrencia aproximada a los 50 años. Esto es posible gracias a que la metodología probabilística zonificada permite la identificación de este sismo a partir de la desagregación, aunque da autonomía en la identificación de las posibles fuentes que cumplen con este criterio en su historia sísmica.

3. Actualmente, según el análisis de los espectros de diseño, Bogotá D.C. cuenta con unos espectros que sobrevaloran la peligrosidad existente según el estudio, al extender las características de diseño, se incrementa el gasto de la edificabilidad de la ciudad que no son sumamente necesarios, por lo que se recomienda identificar los actores que deben cumplir con estas características a cabalidad tal y como son grandes industrias o servicios especializados.

4. La ciudad de Bogotá D.C. cuenta con una zonificación sismogenética deficiente a comparación con las características geomorfológicas, macro sísmicas y geológicas del territorio colombiano, al no combinar las diversas fuentes (fallas) del territorio junto con su comportamiento (mecanismos focales); obstaculizando los proyectos de investigación asociados con esta metodología, demeritando su potencialidad en la caracterización de la peligrosidad.

5. Los modelos de atenuación pueden presentar extrapolaciones indeseadas en el proceso de cálculo de la peligrosidad, especialmente por las variaciones en las condiciones del medio y las características geológicas de nuestro territorio, por lo que es necesario desarrollar modelos GMPE que logren expresar nuestras condiciones geológicas con los estudios de peligrosidad sísmica de una manera más completa.

6. El método espacial muestra un amplio potencial para el cálculo de la peligrosidad sísmica y en especial en las relaciones probabilísticas asociadas a las características físicas del método, sin embargo, la ausencia de correlación de una mayor cantidad de variables en la metodología espacial aumento el error de los mapas de isolíneas debido a la imposibilidad de definir correctamente las zonas sísmogenéticas acordes con este modelo.

7. La implementación eficiente del método del Árbol Lógico facilitó la toma de decisiones respecto a los resultados obtenidos de diferentes combinaciones de GMPE para la estimación de la peligrosidad dando como resultado el nodo COzyz, además de brindar un valor de credibilidad en función del acoplamiento de los modelos para el emplazamiento estudiado. Sin embargo, queda abierta la posibilidad de introducir la variabilidad en características propias de las fuentes (Mecanismos focales).

8. Se presenta el sustento para el desarrollo de nuevos modelos sismoresistentes para la ciudad de Bogotá D.C, centrándose en condiciones estructurales de las edificaciones en suelos lacustres y terrazas que necesitan un rediseño a causa del sobrecosto ocasionado por los espectros de diseño de la NSR-10 y los resultados encontrados en este estudio.

9. Este trabajo de investigación presenta un estudio para que los agentes públicos tengan conocimiento sobre la peligrosidad existente en Bogotá ante un evento sísmico, y así mismo tengan herramientas para mitigarlo, brindando espacios de información que permitan concientizar a la población ante la amenaza haciendo énfasis en la calidad del proceso constructivo.

7. BIBLIOGRAFÍA

[1] Alcaldía Mayor de Bogotá D.C, Gobierno seguridad y convivencia. (2010). Zonificación de la respuesta sísmica de Bogotá para el Diseño sismo resistente de edificaciones – INFORME FINAL, *Subdirección de técnica y gestión,* octubre 2010.

[2] Annemarie Christophersen et al. (2014). *Development of the Global Earthquake Model's neotectonic fault database, Revista Springer, DOI 10.1007/s11069-015-1831-6.*

[3] Baquero, A. E. (2003). *La sismicidad histórica en Colombia*. *Revista Geográfica Venezolana*, *44*(2), 271-283.

[4] Baquero, A. E. (2003). *Historia sísmica de Bogotá, Sociedad Geográfica de Colombia (SOGECOL),* 1-30.

[5] Benito Oterino, B. (2013). Geología, terremotos y riesgo sísmico: Avances y perspectivas. *Encuentros Multidisciplinares*.

[6] Belén Benito et al. (2008). *PROYECTO RESIS II – Evaluación de la amenaza sísmica en centroamérica*. Abril 2008.

[7] Colombia. Código de Construcciones Sismo-Resistentes. (1984). *Código colombiano de construcciones sismo-resistentes: decreto 1400 de 1984*. Camacol.

[8] Colombia. Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). *Censo general 2005*. (2005).

[9] Colombia. Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático (IDIGER). 9*Caracterización General del Escenario de Riesgo Sísmico en Bogotá*. (2017).

[10] Colombia. SGC (Servicio Geológico Colombiano). (2011). *Historia de la Red Sismológica Nacional de Colombia (R.S.N.COL).*

[11] Colombia. Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo urbano. (1997). *Reglamento Colombiano de construcción sismorresistente (NSR 10),* Bogotá D.C.

[12] Cornell C.A. (1968). Engineering Seismic Risk Analysis. *"Bulletin of the Seismological Society of America"*, 58(5):1583-1606.

[13] El Espectador (2009). *Bogotá, enfrentamiento de siete Terremotos*, 15.

[14] El País (2015). *Terremotos más fuertes en Colombia*, *Registro de los movimientos telúricos más significativos en la historia de Colombia* 15.

[15] Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología Universidad Internacional de La Rioja (UNIR), ¿Que es resonancia?, Dr. Ing. Fernando López Hernández E.

[16] Espinosa, A., en prensa (2003). Documentos para la Historia Sísmica de Colombia. Enciclopedia de Desastres Naturales Históricos de Colombia, volumen 4. Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales - Universidad de Quindío, Bogotá.

[17] E.U.I.T. de Topografía Universidad Politécnica de Madrid (1999). *Peligrosidad Sísmica,* España, Belén Benito y Esther Jiménez 1999, ISSN: 0214-4557, Catedrática de Geología.

[18] Eurocode 2008, *EUROPEAN STANDARD NORME EUROPE NORM EN 1991-1-1,* April 2002 ICS 91.010.30 Supersedes ENV 1991-2-1:1995 Incorporating corrigendum March 2009.

[19] Evaluación de Riesgos Naturales – Colombia (ERN-Colombia). (2006). *Estimación de pérdidas económicas para diferentes escenarios de riesgo en edificaciones públicas y privadas en Bogotá y análisis económico del riesgo residual en el Distrito Capital de Bogotá*. Bogotá.

[20] GEM – Global earthquake Model, working together to assess risk. (2015*) The GEM Faulted Earth Subduction Interface Characterisation Project – GEM Faulted Earth Global Component Project*. K. Berryman, L. Wallace, G. Hayes et al. Abril, 2015, V2.0.

[21] GEM – Global earthquake Model, working together to assess risk. (2015-2*) The GEM Faulted Earth Project, Technical report – GEOLOGICAL, EARTHQUAKE AND GEOPHYSICAL DATA*. Christophersen, A. Berryman, K. Litchfield. Abril, 2015 – 2, V1.0.

[22] Gutenberg B. and. Richter C.F. (1942) *Earthquake Magnitude, Intensity, Energy and Acceleration*. Bull. Seismol. Soc. Amer., vol. 32, pp. 163-191

[23] Gutenberg B. and Richter C.F. (1944). *Frequency of earthquakes in California. Bulletin of the Seismological Society of America.* 34: 185-188.

[24] Mario A. Salgado et al (2010). *Evaluación de la sismicidad de Colombia. Actualización y uso en las nuevas normas colombianas de diseño sismo resistente NSR-10,* Revista de ingeniería de la universidad de los Andes. Bogotá.

[25] Geological Society of America (2004). *Triggering of destructive earthquakes in El Salvador*, España, Febrero 2004.

[26] Gutenberg And Richter (1944). Frequency of Earthquakes in California, Bulletin of the seismological society of America, 34, 185-188, 1944.

[27] J.C. Stepp, National Oceanic and Atmospheric Administration, 1972, *Analysis of completeness of the Earthquake Sample in the Puget Sound Area and its Effect on Statistical Estimates of Earthquake Hazard*, Boulder, Colorado 80302.

[28] Kennet W. Campbell and Yousef Bozorgnia (2013). *NGA-West2 Campbell-Bozorgnia Ground Motion Model for the Horizontal Components of PGA, PGV, and 5%-Damped Elastic Pseudo-Acceleration Response Spectral for Periods Ranging from 0.01 to sec*, PEER Report 2013/06, Pacific Earthquake Engineering Research Center Headquarter at the University of California, Berkeley, mayo 2013.

[29] FEMA 450-1, *NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures*, 2003 Edition, Program on Improved Seismic Safety Provisions.

[30] NRC-DOE-EPRI (1997). *Recommendations for Probabilistic Seismic Hazard Analysis: Guidance on Uncertainty and Use of Experts*. NUREG/CR-6372 Vol. 1 y 2.

[31] Office of United Nations Disaster Relief Coordinator (UNDRO), 1980, Palais des Nations, CHS-1211, *Natural disasters and Vulnerability Analysis: Report of Expert Group Meeting*, Geneva 19, and Switzerland.

[32] RED (Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina). (1997). *Historia y desastres en américa latina*, Perú.

[33] Salgado, M. A., Bernal, G. A., Yamín, L. E., & Cardona, O. D. (2010). Evaluación de la amenaza sísmica de Colombia. Actualización y uso en las nuevas normas colombianas de diseño sismo resistente NSR-10. *Revista de Ingeniería*, (32), 28-37.

[34] Scordilis, E.M. (2006). *Empirical Global Relations converting Ms and mb to Moment Magnitude.* Journal of Seismology. April 2006, Volume 2, Issue 2, pp 225-236.

[35] Semana (2015). *¿Cuál es el riesgo sísmico en Bogotá?* 15.

[36] SGC (Servicio Geológico Colombiano). (2011). *Historia de la Red Sismológica Nacional de Colombia (R.S.N.COL).*

[37] UNDRO. (1979). *"Natural Disasters and Vulnerability Analysis", Report of Experts group meeting*, Genova, Julio 1979.

[38] Universia (2010). *Estudio de la Universidad de los Andes sobre posible sismo en Bogotá.*

[39] Universidad de los Andes y el Instituto de investigaciones en Geo ciencias, Minería y Química (INGEOMINAS) (1996). *"Estudio de General de Amenaza Sísmica de Colombia"*. Bogotá, Colombia.

[40] Universidad Politécnica de Madrid. *Geología, terremotos y riesgo sísmico: avances y perspectivas,* España, Belén Benito Oterino, Catedrática de Geología.

[41] Youngs, R. R., Chiou, S.-J., Silva, W. J., & Humphrey, J. R. 1997. *Strong ground motion attenuation relationships for subduction zone earthquakes.* Seismological Research Letters, 68(1), 58–73.

[42] Zhao, et al. (2006). *Attenuation relations of strong ground motion in Japan using site classification based on predominant period.* Bulletin of the Seismological Society of America, 96(3), 898–913.

[43] Instituto Geológio y Minero de España (2015). *Creación de UN modelo de zonas sismogenéticas para el cálculo del mapa de peligrosidad sísmica de España,* Integración de conocimiento y opinion a través de tres modelos sucesivos. Julian Garcia Mayordomo, Área de riesgos Geológicos.

[44] Monica Arroyo Gil (2015). *Nueva propuesta de zonificación sísmica en América Central y análisis de sensibilidad en los resultados de amenaza.* Universidad Politécnica de Madrid, Trabajo fin de grado.

8. GLOSARIO

Aceleración pico del suelo (PGA): Valor máximo que toma la aceleración del sismo en el acelero grama, este suele ser considerado con las siglas PGA y se asocia al valor del espectro de respuesta en la abscisa 0.

Árbol lógico: Herramienta utilizada para el análisis de diversas opciones para el cálculo de la peligrosidad sísmica, en la cual se asigna un sistema de pesos que representan la verosimilitud de analista respecto al comportamiento más cercano al real. Está compuesta por nodos, los cuales representan los elementos que intervienen en el cálculo, y las ramas que representan las diferentes opciones de dichos elementos.

Catálogo sísmico: La recopilación del conjunto de sismicidad histórica de un territorio, normalizados y con los mismos parámetros.

Desagregación: La desagregación hace referencia a la técnica utilizada para el tratamiento de los resultados del estudio probabilístico el cual nos permite definir el terremoto o sismo de control. En la cual se identifican las contribuciones a la peligrosidad en diferentes intervalos de magnitud, profundidad entre otras, logrando así identificar el sismo que mayor probabilidad presenta ocurrencia en la zona.

Deslizamientos de laderas: Este fenómeno es bastante conocido, y generalmente se encuentra relacionado con una gran variedad de fenómenos como los son las lluvias torrenciales y los terremotos. En este caso en particular lo asociaremos con la pérdida de resistencia del suelo posibilitando de esta manera el desprendimiento de los taludes, esto estará asociado directamente con las características litológicas, relieve, la humedad y el ángulo de los taludes existentes.

Espectro de diseño: Espectro de respuesta utilizado para el diseño de estructuras civiles.

Espectro de respuesta: Curva que representa la aceleración máxima experimentada por un oscilador en periodo natural en respuesta de una excitación producida en su base visualizado en el acelero grama. Este espectro suele ser utilizado como base para el diseño de estructuras.

Falla: Zona de fractura que materializa el contacto entre dos partes de roca o del terreno, el cual ha presentado un desplazamiento entre ellas.

Falla activa: Falla que presenta evidencias de desplazamiento en tiempos recientes, es decir en los últimos 10.000 años.

Licuefacción: Este fenómeno físico hace referencia a un proceso que ocurre en algunas ocasiones generalmente en presencia de sismo con una escala de (VI) en la escala de Mercalli, en el cual el suelo se comporta como si fuera un líquido, esto se reduce principalmente a que las construcciones se hunden en el suelo sin general presentar estas un gran daño en la estructura (barro); esto sucede debido a la pérdida de resistencia del suelo debido a que la presión generada al momento de la liberación de energía se asimila con la fuerza de cohesión de las partículas del suelo, ocasionando así una separación de los materiales.

Magnitud Local (Ml): Magnitud como valor único resultado de un registro instrumental de la energía liberada en el sismo, también es conocida como la escala de Richter (Radio de 600 Km) la cual se determina a partir de la amplitud presentada por el sismo y un sismo patrón.

$$ML = Log\ A - Log\ A_0 \tag{1}$$

Dónde: A: Amplitud máxima registrada y A0: Amplitud máxima sismo patrón.

Magnitud de ondas superficiales (Ms): Se basa directamente en la amplitud máxima registrada por las ondas superficiales rayleigh con un periodo de 18 a 22 segundos.

$$Ms = Ln\left(\frac{A}{T}\right) + 1{,}66\ Ln\ D\ + 3{,}30 \tag{2}$$

Donde A: Amplitud máxima horizontal, T: periodo de la onda en segundos y D: Distancia epicentral en grados.

Magnitud de ondas de cuerpo (Mb): Para poder determinar el valor de la magnitud de ondas de cuerpo se debe implementar un factor de conversión del valor Ms para una profundidad mayor a 50 km, además de basarnos en el periodo de las ondas de cuerpo con T ≈ 1 segundo.

$$Mb = Ln\left(\frac{A}{T}\right) + Q\ (D, h) \tag{3}$$

Donde A: Amplitud, T: periodo en segundos., Q: Factor de atenuación el cual se encuentra en función de la distancia (D) y la profundidad focal en km (h).

Magnitud Momento (Mw): La magnitud momento hace referencia a la cantidad de energía liberada a partir del momento sísmico (Hiroo Kanamori, California), actualmente corresponde a una de las magnitudes más implementadas por los científicos debido a que es perdurable, esta se define a partir de la siguiente expresión.

$$Mw = \frac{2}{3} Log\ MO\ - 10{,}7\ ;\ MO =: DA \tag{4}$$

Siendo MO: movimiento sísmico, es la rigidez de la roca, D: el desplazamiento promedio de la roca y A el área de segmento de ruptura (Volumen cm^3).

Magnitud de energía (Me): Esta medida de magnitud representa el nivel de daño a estructuras debido a la energía liberada en un sismo.

$$Me = \frac{2}{3}\ Ln\ E\ - 9{,}9\ ;\ Ln\ E\ = 11{,}4\ +\ 1{,}5\ Ms \tag{5}$$

En donde la cantidad de energía deberá estar expresada en Ergios.

Magnitud de duración (Md): La magnitud de duración se determina mediante la duración registrada de la señal sísmica.

$$Md = s\ Log\ (J) - b + cD \quad (6)$$

Donde J: Duración del registro de la señal en segundos, D: distancia epicentral y a, b, c: coeficientes ajustados que el Md corresponde al Ml.

Mapa de isosistas: los mapas de Isosistas son el resultado de la evaluación de intensidad de varias fuentes, en el cual se identifican zonas con las mismas probabilidades de riesgo, los cuales especializa la distribución de los daños, su movimiento, la localización, frecuencia, profundidad focal, áreas de réplicas.

Modelo del terremoto característico: Modelo de ocurrencia de sismos, en el cual se asume que las fallas liberan energía sísmica a través de un terremoto máximo y no por fraccionamiento en diversos sismos leves.

Paleosismicidad: La paleosismicidad es una de las técnicas más recomendadas para la identificación de fallas activas, ya que se encargan de identificar a través del comportamiento de los estratos rocosos, analiza si en alguna época se presentaron procesos de liberación de energía, estimando de esta forma la fecha estimada y la magnitud según el desplazamiento presentado. Lo mismo sucede en el caso GPS ya que actualmente se implementan estos sistemas para la medición de desplazamientos anuales por parte de la corteza y fallas.

Parámetro alfa: Se encuentra relacionado con el número de sismos acumulados en un área sismo genética, es un derivado de la ley de Gutenberg-Richter en donde $\propto = a.\ln 10$.

Parámetro beta: Es un parámetro de sismicidad el cual se relaciona con la proporción entre los terremotos de una amplia magnitud y terremotos de baja magnitud ocurridos dentro del área sismo genética. Igualmente, que en el caso anterior se deriva de la ley Gutenberg-Richter en donde $\beta = b.\ln 10$.

Parámetro épsilon: Este parámetro es el que representa el número de desviaciones estándar a utilizar para el cálculo del parámetro de movimiento a través de un modelo de movimiento fuerte del suelo, en otras palabras hace referencia a la precisión tenida en cuenta para el cálculo de los espectros.

Parámetro del movimiento: Es un término sísmico implementado para definir el tipo de movimiento de suelo usado en el análisis. Estos parámetros son aquellos que permiten definir el movimiento, algunos de ellos son la aceleración espectral, PGA, PGV, PGD.

Peligrosidad sísmica: La peligrosidad sísmica se define como la probabilidad de excedencia de un determinado nivel de movimiento a causa de los terremotos que afectan la zona de estudio.

Periodo de recurrencia: Es el intervalo de tiempo que trascurre entre la ocurrencia de un sismo máximo y otro en el modelo de terremoto característico.

Periodo de retorno: Es el inverso de la probabilidad de excedencia del movimiento del suelo.

Periodo de recurrencia: Número de años que trascurren desde la ocurrencia de un terremoto de magnitud x hasta la ocurrencia del siguiente

Probabilidad de excedencia: Es la probabilidad existente de que un nivel de movimiento sea superado en un emplazamiento por causa de la acción de fallas (sismos) en el área de influencia.

Sismicidad histórica: Hace referencia al conjunto de sismos ocurridos a lo largo del tiempo en un territorio determinado.

Sismo de control: Es el terremoto que presenta una mayor contribución a la peligrosidad de un emplazamiento y con un nivel de movimiento y profundidad particular. En los estudios probabilistas se detecta a través del proceso de desagregación sísmica permitiendo conocer (Magnitud, Intensidad).

Tasa anual de recurrencia de sismos: Número de terremotos de magnitud igual o superior a una magnitud umbral (Peligrosidad despreciable) que ocurren anualmente en una zona.

Terremoto: Definimos terremoto como la liberación abrupta de energía almacenada en la roca que ha sido sometida a grandes esfuerzos, una vez ésta llega a su máxima resistencia esta se fractura súbitamente, provocando dicho fenómeno. Los Fenómenos derivados de un sismo: Como es bien conocido una de las principales consecuencias del desarrollo de sismos, es que estos pueden llegar a desencadenar la existencia de otros fenómenos que pueden llegar a ocasionar daños o pérdidas aún mayores en un emplazamiento en particular, estos dependen netamente de las condiciones presentes en la zona de estudio e igual mente su capacidad de daño dependen directamente de la magnitud y el impacto del sismo, entre ellos podremos identificar: Licuefacción, Deslizamiento de laderas o Tsunamis.

Terremoto característico: Hace referencia al terremoto de mayor magnitud que ocurre periódicamente, el cual define la sismicidad de una fuente sísmica de acuerdo con su modelo.

Tsunamis: Este fenómeno natural en la mayoría de los casos depende netamente de la presencia de un evento sísmico en la corteza oceánica, ya que este generará una serie de condiciones físicas que amplifican la amplitud de la onda a medida que se acerca está a la corteza terrestre, a esto se le conoce como la transformación de la energía cinética en energía potencial a la hora de llegar a la corteza continental.

Vulnerabilidad de edificación: El Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático (IDIGER) es el encargado de identificar esta vulnerabilidad y tiene como misión, dirigir, coordinar y orientar el Sistema Distrital de Gestión de Riesgos y promover políticas, normas, planes, programas y proyectos con el fin de reducir los riesgos para contribuir al mejoramiento de la calidad de vida de la población de Bogotá.

Por consiguiente, ante la vulnerabilidad busca (IDIGER, 2017):

- Divulgación y promoción de normas de construcción: Mediante el reforzamiento estructural de infraestructura y edificaciones, y la intervención para la protección de bienes de interés cultural.
- Vigilancia y control de procesos de construcción: Mediante la reposición de edificaciones indispensables y de atención a la comunidad.
- Capacitación pública en métodos constructivos de vivienda: Mediante incentivos por reducción de vulnerabilidad sísmica en el sector privado.

En este caso existen factores de vulnerabilidad donde se caracteriza los predios de Bogotá con la siguiente información para identificar los daños ante un probable sismo.

Mediante la vulnerabilidad de las edificaciones se busca el concepto de ingeniería social y el manejo del territorio por medio de la planificación de la región. Bogotá se encuentra delimitada por medio de los cerros orientales y está intervenida con un conjunto de geo formas con inclinación y altura elevada, es por ello que la vulnerabilidad aumenta ante una posible remoción de masas en edificaciones capitalinas, es decir un factor de vulnerabilidad es la **topografía**.

La **vetustez** de una construcción es una característica a tener en cuenta ya que dependiendo del tiempo de construcción y la estructura que la sostiene se puede hablar de un tiempo de durabilidad entre los 100 y 70 años, sin embargo, hay viviendas que ya han superado ese periodo desde su construcción, por ejemplo, aquellos de la época colonial. La **altura** de un predio representado en número de pisos, este factor de vulnerabilidad es importante, ya que dependiendo el número de pisos podemos identificar la vulnerabilidad ante un sismo teniendo en cuenta la amplificación o de-amplificación de la onda sísmica.

Mediante las consecuencias de los sismos, se han cuestionado severamente la calidad de las construcciones de Bogotá. El Aviso del Terremoto, documento que describe los efectos del sismo, discute algunos aspectos relacionados con la calidad de los edificios y las casas de habitación de la época e incluso hace las primeras recomendaciones en materia de construcciones sismo resistentes (Espinosa, 2013). Observamos que por falta de control en la actualidad exista viviendas con la ausencia de normas sismo resistente que tienden a aumentar la vulnerabilidad. Es por ello que los **materiales** y **tipología de estructura** son otro factor de vulnerabilidad.

Vulnerabilidad de población: Uno de los grandes problemas para la ciudad es que, en caso de un terremoto, se perdería mucha de la infraestructura pública porque no está asegurada. Eso demuestra una falta de conciencia de la posibilidad de los desastres. Otro tema es la vulnerabilidad social. Esta depende del nivel de percepción que la gente tiene sobre un desastre. En Colombia la vulnerabilidad social es alta debido a la pobreza, desinformación y falta de educación en el tema. En países cuyas amenazas son constantes hay una conciencia mayor del riesgo. Por eso en países como Japón, se presentan sismos como el de Haití, pero solo se registran unos cuantos heridos (Semana, 2010).

De acuerdo con la exposición podemos diferenciar la población vulnerable, entre esa población vulnerable se puede identificar los menores de edad, las mujeres gestantes, adultos mayores y discapacitados. También podemos relacionar la vulnerabilidad de la población por los 6 estratos socioeconómicos de las viviendas. Se asume que tiene altos índices de vulnerabilidad aquellas

viviendas en estrato uno y dos ya que la población de estos estratos tiende a una baja capacidad económica lo que causa la construcción de viviendas en zonas de riesgos ya sean por inundación, remoción de masa, entre otros. Además, los materiales en muchos casos son materiales reciclados como tejas reutilizadas y madera, es decir que en estas viviendas no son sismo resistente y son vulnerables ante un sismo, es decir estas viviendas serían las más probables a sufrir los mayores daños en Bogotá.

Zona sismo genética: Extensión del territorio que representa una superficie física con características homogéneas, en este caso que considera la equi-probabilidad de ocurrencia de un sismo al interior de este espacio.

Zonificación: Es una división del territorio en función de características similares ejemplo fuentes sismo genéticas, criterios sísmicos o tectónicos.