



Libertad y Orden

**INSTITUTO COLOMBIANO DE
GEOLOGIA Y MINERIA
INGEOMINAS**



**DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO
DE GESTIÓN DEL MEDIO AMBIENTE
DAGMA**

**INGEOMINAS
SUBDIRECCIÓN DE AMENAZAS GEOLÓGICAS Y
ENTORNO AMBIENTAL**

***ESTUDIO DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA
DE SANTIAGO DE CALI***

Convenio No.02 de 2002

SUBPROYECTO DE SISMOTECTÓNICA

***Informe No.1-8
Caracterización de Fuentes Sismogénicas***

Bogotá, Diciembre de 2005

**República de Colombia
MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA
INSTITUTO COLOMBIANO DE GEOLOGIA Y MINERÍA - INGEOMINAS**



JULIAN VILLARRUEL TORO
DIRECTOR GENERAL INGEOMINAS

INES F. CAICEDO HERNANDEZ
DIRECTORA DAGMA

ALBERTO NUÑEZ TELLO, DIRECTOR TECNICO SERVICIO GEOLOGICO, INGEOMINAS
MARTA L. CALVACHE VELASCO, SUBDIRECTORA AMENAZAS GEOLOGICAS, INGEOMINAS
CARLOS E. ALVARADO FLOREZ, JEFE DE PROYECTO, INGEOMINAS

GRUPO TECNICO INGEOMINAS

CRISTINA DIMATE, LIDER TEMATICO

JAIME ROMERO
ANIBAL OJEDA
MONICA ARCILA
CARLOS ALVARADO

EDICION FINAL

ANA I. ALVARADO
ROSA DAZA



TABLA DE CONTENIDO

CAPITULO 1	1
INTRODUCCION	1
CAPITULO 2	2
CONCEPTOS BASICOS	2
2.1 ELEMENTOS DEL ANÁLISIS PROBABILÍSTICO	2
2.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS FUENTES SÍSMICAS	4
2.2.1 Fuente sísmica	4
2.2.2 Rango de magnitudes - Magnitud máxima	5
2.2.3 Recurrencia sísmica	7
CAPITULO 3	9
CARACTERIZACIÓN DE FUENTES SÍSMICAS PARA EL PROYECTO MZSC	9
3.1 LOCALIZACIÓN Y GEOMETRÍA DE LAS FUENTES	9
3.1.1. Estructuras sismogénicas en la corteza continental	9
3.1.2. Segmentación	11
3.1.3. Fuentes sismogénicas asociadas a la subducción de la placa oceánica	14
3.2 RECURRENCIA SÍSMICA	15
3.3 MAGNITUDES MÍNIMA Y MÁXIMA	17
3.4 SÍNTESIS DEL MODELO SISMOTECTÓNICO	20
CAPITULO 4	22
DISCUSION	22
CAPITULO 5	25
BIBLIOGRAFIA	25



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Etapas principales en la aproximación probabilística para la estimación de la amenaza sísmica (Abrahamson, 2001).....	3
Figura 2. Fuentes sismogénicas corticales definidas para la evaluación probabilística de la amenaza sísmica para la Ciudad de Cali.....	10
Figura 3. Fuentes sismogénicas de subducción definidas para la evaluación probabilista de la amenaza sísmica.....	14
Figura 4. Regiones definidas para la estimación del parámetro b según criterio MB2.....	16

Nota: Figuras Nos. 5 y 6 anexas

LITA DE TABLAS

Tabla 1. Fuentes Sismogénicas definidas a nivel cortical y segmentos asociados.	13
Tabla 2. Estimación de la magnitud máxima de acuerdo con criterios neotectónicos (método MM1).	19
Tabla 3. Parámetros de Tasa Sísmica de las fuentes definidas en el Modelo Sismotectónico para el Proyecto MZSCali.....	21

ANEXOS

Anexo 1	Modelos y Parámetros de Tasa Sísmica a partir de datos sismológicos
----------------	---



CAPITULO 1

INTRODUCCION

En los estudios de amenaza sísmica, bien sea en la aproximación probabilista o en la determinista se supone que las condiciones tectónicas y sismológicas de la región en estudio puede representarse por un *modelo sismotectónico* (zonas poligonales, fallas, planos) con sus características de actividad. La caracterización de los elementos del modelo es el elemento más importante en la estimación de la amenaza. En términos del análisis probabilístico de la amenaza, que es la metodología que se ha seguido en el Proyecto de Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Santiago de Cali (MZSCali), la caracterización significa estimar el sitio de ocurrencia, el tamaño, y la frecuencia de futuros sismos que puedan originar movimientos del suelo significativos en la ciudad. El análisis se propone determinar para cada fuente potencial la tasa promedio de ocurrencia de sismos y usar esta tasa como un indicativo de la probabilidad de ocurrencia futura.

La caracterización de la actividad sísmica de una región en el largo plazo requiere el análisis y la integración de una serie de observaciones en distintas escalas de tiempo y grados de resolución, que incluyen disciplinas como la geología, la neotectónica, la sismicidad histórica e instrumental y la geofísica. Los estudios temáticos específicos se han desarrollado en etapas previas de las investigaciones del Proyecto MZSCali, correspondientes al Subproyecto de Sismotectónica, los cuales se han presentado en los informes: Investigaciones Neotectónicas en el Centro Occidente Colombiano (Informe No.1.3), Estudio de Sismicidad Histórica (Informe No.1.4), Actualización del Catálogo de Sismos del Occidente Colombiano (Informe No.1.5), Caracterización de Fuentes Sísmicas de Subducción (Informe No.1.6) y Elementos Sismológicos para la Caracterización de la Actividad Cortical en el Occidente Colombiano (Informe No.1.7). En estos estudios se presentan las aproximaciones propias de cada disciplina, se sintetiza el conocimiento temático, se especifican los datos que se utilizan en el análisis y se presentan los aportes de la disciplina a la caracterización de distintos aspectos de la actividad sísmica.

El presente informe ha sido realizado para el Proyecto MZSCali a través del Convenio INGEOMINAS - DAGMA, el cual presenta una *síntesis* de los elementos aportados por varias disciplinas en los estudios anteriormente relacionados y es el resultado de la discusión y valoración de los mismos entre los especialistas y los participantes en la realización de los estudios temáticos. En la primera parte de este informe se presentan los conceptos básicos en la caracterización de las fuentes y la connotación que se les ha dado en este estudio; en la segunda se presentan los criterios específicos y la metodología utilizados para la cuantificación de las características de la actividad sísmica. Finalmente, se presenta el resumen de las características de las fuentes sísmicas seleccionadas. Esta caracterización constituye la información de entrada para el cálculo de la amenaza sísmica probabilista para la ciudad de Cali.



CAPITULO 2

CONCEPTOS BASICOS

2.1 ELEMENTOS DEL ANÁLISIS PROBABILÍSTICO

El método de amenaza probabilístico es ya clásico. En sus fundamentos, la metodología que actualmente se utiliza es la planteada por Cornell (1968), que está bien documentada en la literatura (e.g., Reiter, 1990; Sarria, 1990; Kramer, 1996). El objetivo del análisis es obtener una estimación cuantitativa de la amenaza por movimiento del terreno asociado con sismos (a nivel de roca). El análisis en términos probabilísticos implica, de una parte, construir un conjunto completo de posibles escenarios sísmicos y especificar la tasa a la cual cada escenario ocurre, y, de otra, seleccionar un abanico de posibles movimientos del terreno para cada escenario.

El análisis probabilístico se expresa como la probabilidad de excedencia de ciertos movimientos del suelo calculados para sismos de todos los tamaños y todas las localizaciones dentro de rangos definidos. Las curvas de amenaza sísmica, que es la manera usual como se representa la amenaza, se obtienen para zonas o fuentes sísmicas individuales y se combinan para obtener la amenaza "agregada" de todas las fuentes.

De manera gráfica el procedimiento que se sigue en el análisis probabilístico se puede sintetizar como en la **Figura 1**. En esta gráfica las dos primeras etapas están relacionadas con la caracterización sismológica de las fuentes. En la primera se identifican las fuentes sísmicas potenciales y se define su geometría, y en la segunda se definen la distribución probable de magnitudes para cada fuente, f_M , y la distribución probable de distancias de la fuente al sitio, f_R . La tercera etapa consiste en la estimación del efecto sísmico en el terreno inducido por cada una de las fuentes consideradas para determinado rango de magnitudes y distancias; este efecto se expresa por medio de curvas de probabilidad de excedencia, $P[Y > y^*]$, que se construyen a partir de relaciones de atenuación de las ondas sísmicas. La cuarta etapa consiste en la estimación de la amenaza en el sitio de interés por medio de la agregación de los efectos de los posibles futuros sismos que pueden ocurrir en todas las fuentes sísmicas para diferentes probabilidades de ocurrencia. La amenaza se puede representar en forma de curvas de probabilidad de excedencia y de espectros uniformes de amenaza.

Cuando el propósito es estimar la probabilidad de varias amenazas en un periodo de tiempo dado se debe considerar la distribución de sismos en el tiempo para cada una de las fuentes sísmicas. Una distribución que se utiliza con frecuencia para modelar la ocurrencia de sismos en el tiempo es la de Poisson, la cual se combina con una relación de recurrencia para estimar la tasa promedio de excedencia de una determinada magnitud, v .

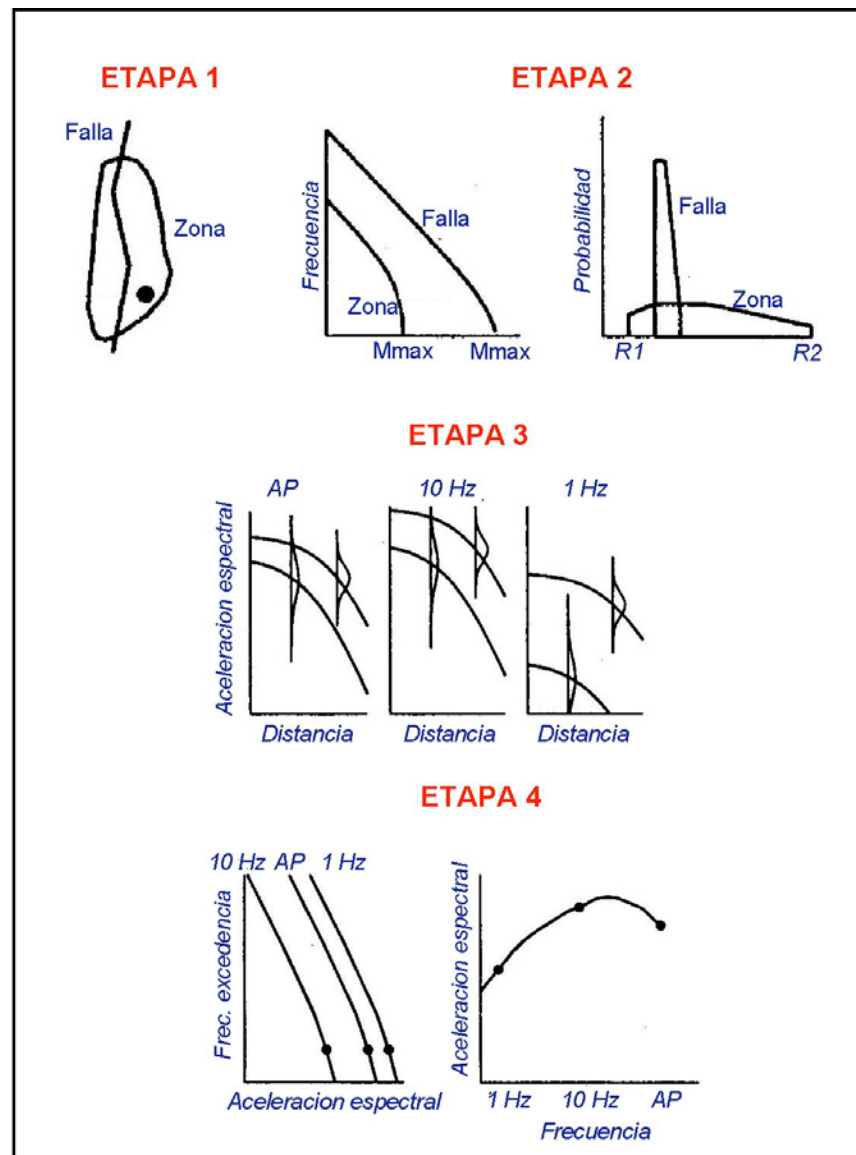


Figura 1. Etapas principales en la aproximación probabilística para la estimación de la amenaza sísmica (Abrahamson, 2001).

Si el sitio donde se quiere calcular la amenaza está en una región con N_s fuentes sísmicas potenciales, cada una de las cuales tiene una tasa promedio de excedencia v_i , la tasa total de excedencia λ_{y^*} para el sitio será:

$$\lambda_{y^*} = \sum_{i=1}^{N_s} v_i \iint P[Y > y^* / m, r] f_{M_i}(m) f_{R_i}(r) dm dr \quad (1)$$

donde:

$P[Y > y^* / m, r]$ es la probabilidad de que un sismo con una magnitud m a una distancia r exceda el movimiento del terreno Y desde un valor específico y^* ,



$f_M(m)$ es la función de densidad de probabilidad para la magnitud m ,
 $f_R(r)$ es la función de densidad de probabilidad para la distancia r ,
 v es la tasa promedio de excedencia de la magnitud mínima para la fuente.

En esta aproximación de la metodología probabilista los *elementos básicos requeridos para caracterizar las fuentes sísmicas son la localización y la geometría de las fuentes sísmicas -a partir de las cuales se establece $f_R(r)$ -, la magnitud máxima, y la recurrencia sísmica que incluye la tasa media anual de ocurrencia y la distribución de magnitudes.*

Todas las características de las fuentes involucradas en la estimación de la amenaza sísmica tienen una incertidumbre asociada y están sujetas a la interpretación de los datos disponibles. Estas incertidumbres están relacionadas, de una parte, con la aleatoriedad del fenómeno sísmico mismo, y de otra, con nuestro imperfecto conocimiento del fenómeno, algunas veces asociado con falta de datos y otras con disponibilidad de múltiples modelos alternativos o de tipos de datos. La cuantificación de las incertidumbres de los parámetros es un elemento importante para la estimación de la amenaza.

2.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS FUENTES SÍSMICAS

Muchos de los criterios generales y las definiciones para la caracterización adoptados en el Proyecto MZSC, provienen de una revisión de trabajos de diversos autores: Coppersmith, K. J. (1991), Budnitz *et al.* (1997), Steward *et al.* (2000), Reiter (1991), Kramer (1996), de Polo y Slemmonds (1990) y Schwartz (1988), entre otros.

2.2.1 Fuente sísmica

Una fuente sísmica es una representación espacio-temporal de un fenómeno físico que se manifiesta a través de la sismicidad. A partir de la fuente sísmica se desarrolla el análisis de la amenaza sísmica, como una manera de aproximar la ocurrencia espacial de sismos. Se define como una región de la corteza terrestre que tiene características de sismicidad uniforme y distinta de las fuentes vecinas, y que es capaz de generar movimientos del suelo significativos en el sitio de interés.

La identificación, los tipos de fuente y la caracterización de su comportamiento sismológico dependen de la estrategia e infraestructura disponible para investigar los diferentes ambientes sismotectónicos. Los criterios para seleccionar las fuentes a incluir en la estimación de la amenaza están relacionados con la contribución de la misma al posible movimiento del terreno. Para cada fuente sísmica es necesario definir su localización y geometría, las cuales para efectos de evaluación de la amenaza se pueden agrupar en los siguientes tipos:

Tipo 1 Corresponden a zonas asociadas a trazos de fallas representadas como líneas (a nivel de la superficie del terreno) o planos inclinados en profundidad (efecto del buzamiento de la falla).

Tipo 2 Areas fuente que encierran zonas de sismicidad concentrada.

Tipo 3 Areas fuente regionales (definidas por características sismotectónicas regionales).

Tipo 4 Areas fuente de fondo (zonas amplias sin dominio de una falla mayor pero que puede contener fallas que no afloran, donde se presenta una sismicidad de fondo significativa).



La representación de las fuentes como áreas es una manera de manejar el problema del desconocimiento de la localización de las estructuras causantes de la sismicidad. Estas áreas no representan características físicas de la corteza terrestre.

2.2.2 Rango de magnitudes - Magnitud máxima

El rango de magnitudes de interés para propósitos ingenieriles varía desde sismos de magnitud moderada pero que pueden producir movimientos de terrenos significativos si la distancia fuente-sitio es pequeña, hasta grandes eventos que pueden romper la longitud total de una falla por centenares de kilómetros.

La *magnitud máxima* se define como el sismo más grande que una fuente es capaz de generar, independientemente de su frecuencia de ocurrencia. Este valor es el límite superior en las curvas de recurrencia.

En la literatura de las últimas dos décadas un término frecuentemente asociado con la magnitud máxima es el del *sismo característico*. Este término está relacionado con la observación de que segmentos de algunas zonas de falla se rompen repetidamente con sismos de tamaño similar y de una manera semejante. El sismo característico generalmente está asociado con un intervalo de recurrencia que se puede determinar a partir de datos históricos, paleosísmicos y geológicos. En este estudio no se utiliza este concepto puesto que en el país no se han realizado investigaciones que permitan evidenciar este comportamiento.

Otro tipo de estimativo relacionado con el tamaño de ruptura es el *sismo flotante*. Este corresponde a sismos que ocurren en fuentes sismogénicas muy extendidas o sin definición precisa y que se podrían localizar en cualquier lugar de la fuente. En este estudio se ha utilizado este concepto para fuentes en las cuales no hay elementos suficientes para definir con confianza segmentos de ruptura.

Hay dos aproximaciones básicas para estimar la magnitud máxima: una a partir de constricciones históricas y otra a partir de las máximas dimensiones de ruptura. Los sismos históricos se utilizan generalmente como un *límite inferior* para las magnitudes máximas, las cuales se estiman incrementando en algunas décimas la magnitud del sismo histórico. Como generalmente el registro histórico no es lo suficientemente extenso en el tiempo como para incluir el sismo máximo para cada fuente, particularmente para fallas cuya actividad no es alta, se recurre con frecuencia al análisis de sismos históricos de fuentes tectónicamente análogas. Esta alternativa de usar aproximaciones indirectas en las cuales se constriñen los valores de la magnitud máxima a partir de analogías o comparaciones relativas con fuentes sísmicas similares tiene la ventaja de extender el límite temporal de los datos históricos y paleosismológicos expandiendo espacialmente la población, aunque tienen la desventaja de la incertidumbre en la "similitud" de las fuentes que se comparan.

Los métodos de estimación de la magnitud máxima basados en la dimensiones de la ruptura utilizan correlaciones empíricas entre la magnitud y alguna de las dimensiones de la ruptura (longitud de ruptura, área, movimiento de la falla). Entre las más difundidas están las de Wells y Coppersmith (1994):



$$M = 5.08 + 1.16 \log (SRL) \quad (2)$$

$$M = 6.69 + 0.74 \log (MD) \quad (3)$$

$$M = 6.93 + 0.82 \log (AD) \quad (4)$$

donde M es la magnitud de momento, M_w , SRL es la longitud de ruptura en superficie en km, MD es el desplazamiento máximo en m, y AD es el desplazamiento promedio en m.

El problema en este método consiste en cómo asignar las máximas dimensiones de ruptura esperadas. Entre una de las aproximaciones se encuentra la paleosismicidad que permite establecer una cronología de los grandes eventos, el movimiento de falla asociado a cada evento y la extensión de la ruptura (cuando se excavan varias trincheras a lo largo de la falla).

La longitud de ruptura es una de las dimensiones que se usan con más frecuencia en la estimación de M_{max} . Cuando no hay más información, una técnica que se utiliza es asignar un porcentaje de la longitud total como longitud potencial de ruptura, una vez se ha identificado la traza de falla. Esta técnica se basa en la observación de que las zonas de falla, especialmente las más extensas, no se rompen a lo largo de toda su longitud durante un solo sismo. Cuando hay información geomorfológica a lo largo de la zona de falla ésta suele usarse como indicativo para establecer la longitud de ruptura máxima esperada. Una manera más directa de estimar la longitud de ruptura, en vez de la técnica de adoptar una fracción de longitud de falla, es la segmentación de las fallas.

Segmentación

La técnica de segmentación consiste en identificar en la zona de falla los controles físicos (discontinuidades) que limitan la extensión de la ruptura y dividen la falla en segmentos individuales. La hipótesis de trabajo es que estos segmentos pueden persistir a lo largo de muchos ciclos sísmicos y definen la localización y el tamaño de los sismos futuros.

Las discontinuidades entre los segmentos pueden agruparse en dos categorías: geométricas e inhomogeneidades. Las *discontinuidades geométricas* incluyen intersecciones de fallas, quiebres y rasgos intrínsecos de las zonas de falla (e.g., escalones significativos, cambios de actitud, terminaciones, entre otros). Las *discontinuidades inhomogéneas* incluyen variaciones en el ancho de falla, régimen local de esfuerzos o tasas y sentidos de movimiento, presencia de cuerpos ígneos y cambios en las litologías involucradas.

Si bien la segmentación de fallas es una manera más física de evaluar los tamaños posibles de ruptura, tiene un cierto nivel de incertidumbre en cuanto a la definición de los límites de los segmentos de una misma falla. La complejidad de las rupturas, que pueden involucrar segmentos superpuestos o rupturas de múltiples segmentos, junto con la calidad de la información disponible o la falta de discontinuidades claramente identificables o documentadas a lo largo de una determinada zona de falla (es decir por la falta de soporte histórico o paleosísmico) sugieren cautela en el uso de esta técnica.

2.2.3 Recurrencia sísmica

La recurrencia sísmica incluye la tasa media anual de ocurrencia y la distribución de magnitudes.

La distribución probable de magnitudes para una fuente dada, f_M , está asociada a una *relación de recurrencia*, la cual representa la probabilidad relativa de que una fuente produzca sismos de diferentes magnitudes. Para el PMZSC la distribución de magnitudes se ha modelado por medio de una *función exponencial acotada* o *truncada*. Para este modelo la función de densidad de probabilidad puede expresarse como:

$$f_M(m) = \frac{\beta e^{-\beta(m-m_o)}}{1 - e^{-\beta(m_u-m_o)}} \quad (5)$$

donde $\beta=2.303b$ y b es la pendiente en la relación de Gutenberg-Richter que representa la proporción relativa entre sismos grandes y sismos pequeños; m_u corresponde a la magnitud máxima y m_o a la magnitud mínima.

Distribución de sismos en el tiempo

La ocurrencia de sismos en el tiempo se modela en el PMZSC como un proceso de Poisson. En este modelo los eventos suceden aleatoriamente, sin “memoria” en el tiempo, tamaño o localización de cualquier evento predecesor. En un proceso de Poisson la probabilidad de que una variable aleatoria N (número de ocurrencias en un intervalo de tiempo) tenga un valor n está dada por:

$$P[N = n] = \frac{(\lambda t)^n e^{-\lambda t}}{n!} \quad (6)$$

donde λ es la tasa promedio de ocurrencia del evento y t es el periodo de tiempo de interés. La probabilidad de ocurrencia de al menos un evento en un periodo de tiempo t está dado por:

$$P[N \geq 1] = 1 - e^{-\lambda t} \quad (7)$$

Cuando el evento de interés es la excedencia de una magnitud específica, el modelo de Poisson puede combinarse con una ley de recurrencia apropiada, para predecir la probabilidad de excedencia de al menos un evento en un periodo de t años por medio de la expresión:

$$P[N \geq 1] = 1 - e^{-\lambda_m t} \quad (8)$$

donde la tasa media anual de excedencia, λ_m , puede expresarse como:

$$\lambda_m = \nu \frac{e^{-\beta(m-m_o)} - e^{-\beta(m_u-m_o)}}{1 - e^{-\beta(m_u-m_o)}} \quad \text{con } m_o \leq m \leq m_u \quad (9)$$

donde v y β corresponden a las de la ecuación (1) y m_o y m_u a las de la ecuación (5).

La construcción de las relaciones de recurrencia suele incluir información histórica, instrumental y geológica. Típicamente la sismicidad observada proporciona información sobre la frecuencia de los eventos pequeños y moderados y la pendiente de las curva de recurrencia. El registro geológico proporciona información sobre los eventos de magnitudes mayores. Particularmente, los datos paleosísmicos pueden proporcionar estimación de los intervalos de recurrencia asociados con sismos que han roto la superficie.

Una construcción adicional a las tasas de ocurrencia se puede obtener a partir de las tasas de movimiento de las fallas, asumiendo un modelo de distribución de magnitudes. De esta manera la tasa de movimiento se reparte entre las varias magnitudes sísmicas de acuerdo al modelo de recurrencia $f(m)$. La *tasa de acumulación de momento sísmico* bajo condiciones de acumulación constante puede expresarse como:

$$\dot{M}_o = \mu A s$$

donde M_o es el momento sísmico, μ el coeficiente de fricción, A el área de falla, y s la tasa de deslizamiento.

Para una distribución dada de magnitudes $f(m)$ la *tasa de liberación de momento* puede calcularse como:

$$\dot{M}_o = \lambda \int_{m_o}^{m_u} f(m) M_o(m) dm$$

donde λ indica la tasa de ocurrencia sísmica para $m > m_o$, m_u la magnitud máxima, y M_o se relaciona con m a través de la ecuación:

$$M_o = 10^{1.5m+16.1}$$

Igualando la tasa de acumulación de momento con la tasa de liberación,

$$\lambda = \frac{\mu A s}{\int_{m_o}^{m_u} f(m) M_o(m) dm} \quad (10)$$

Una de las inquietudes que se plantean respecto a este método es hasta qué punto es válida la suposición de la igualdad de tasas de acumulación y liberación para una falla particular, dadas las observaciones de que las tasas de ocurrencia de sismos calculadas con base en información geológica sobreestiman a las tasas que se obtienen a partir de los catálogos históricos, lo cual propende por modelos que consideren que parte de la deformación se produce de manera asísmica.



CAPITULO 3

CARACTERIZACIÓN DE FUENTES SÍSMICAS PARA EL PROYECTO MZSC

La localización geográfica de la ciudad y las evidencias históricas de afectación han obligado el estudio sismotectónico de una amplia región del centro-occidente del país. El área de estudio cubre, de una parte, un área cuadrada de 400 km de lado con centro en Cali, donde la deformación moderada (tasas de movimiento entre 0 y 5 mm/año; Paris *et al.*, 2000) de la corteza continental a lo largo de sistemas de falla mayores es el fenómeno dominante, y, de otra, un área de unos 200x1000 km² a lo largo de la Costa Pacífica donde el fenómeno dominante es la subducción de la Placa de Nazca bajo Suramérica a una tasa de 58 mm/año.

3.1 LOCALIZACIÓN Y GEOMETRÍA DE LAS FUENTES

3.1.1. Estructuras sismogénicas en la corteza continental

Pennington (1981) señala que la forma de los Andes en Colombia corresponde a cadenas montañosas o cordilleras separadas entre sí por depresiones tectónicas, cuya forma esta controlada por las fallas mayores. Esta observación se ha venido comprobando en la compilación de la *cartografía geológica* del territorio nacional (Romero *et al.*, 2005). En general los cinturones de rocas cenozoicas deformadas en los mapas geológicos actuales se presentan en las zonas de transición entre los relieves cordilleranos a los fondos planos de los valles interandinos y de las planicies de los Llanos Orientales de Colombia.

De otra parte, a partir de las redes de *instrumentación sismológica*, se ha obtenido una imagen de la distribución de los epicentros de los sismos mayores ocurridos en los últimos 70 años. Estas observaciones permiten afirmar que la sismicidad superficial, resultado de la acumulación de la energía elástica en la corteza terrestre en Colombia, se encuentra en términos generales bien identificada (Taboada, 2000; Meyer, 1991) y se asocia especialmente a los límites de las grandes unidades morfo-estructurales. De esta forma, a partir de la revisión de los principales documentos que reportan los estados de avance en la identificación de la actividad neotectónica (e.g., Woodward Clyde Consultants, 1983; Page, 1986; Paris *et al.*, 1989; Paris y Sauret, 1991; Paris y Romero, 1994; Paris et al, 2000, Montes y Sandoval, 2001) se identificaron inicialmente las zonas con mayores evidencias de actividad neotectónica en la zona de influencia del Proyecto de Microzonificación Sísmica de Cali.

La información específica adicional, los modelos digitales de elevación y los reconocimientos de campo, entre otros, permitieron identificar como fuentes sismogénicas potenciales aquellas que se presentan en la **Figura 2**. En general estas fuentes, que se presentan como áreas poligonales, están asociadas a fallas o segmentos de falla y sólo en el caso de la zona axial de la Cordillera Central (AXCC) se refieren a una zona de sismicidad difusa sin una

estructura identificable. En este último caso la ausencia de información estructural está condicionada, de una parte, a la falta de exploración geológica y, de otra, al registro sedimentario de una fase de glaciación neógena que cubre los posibles rasgos estructurales.

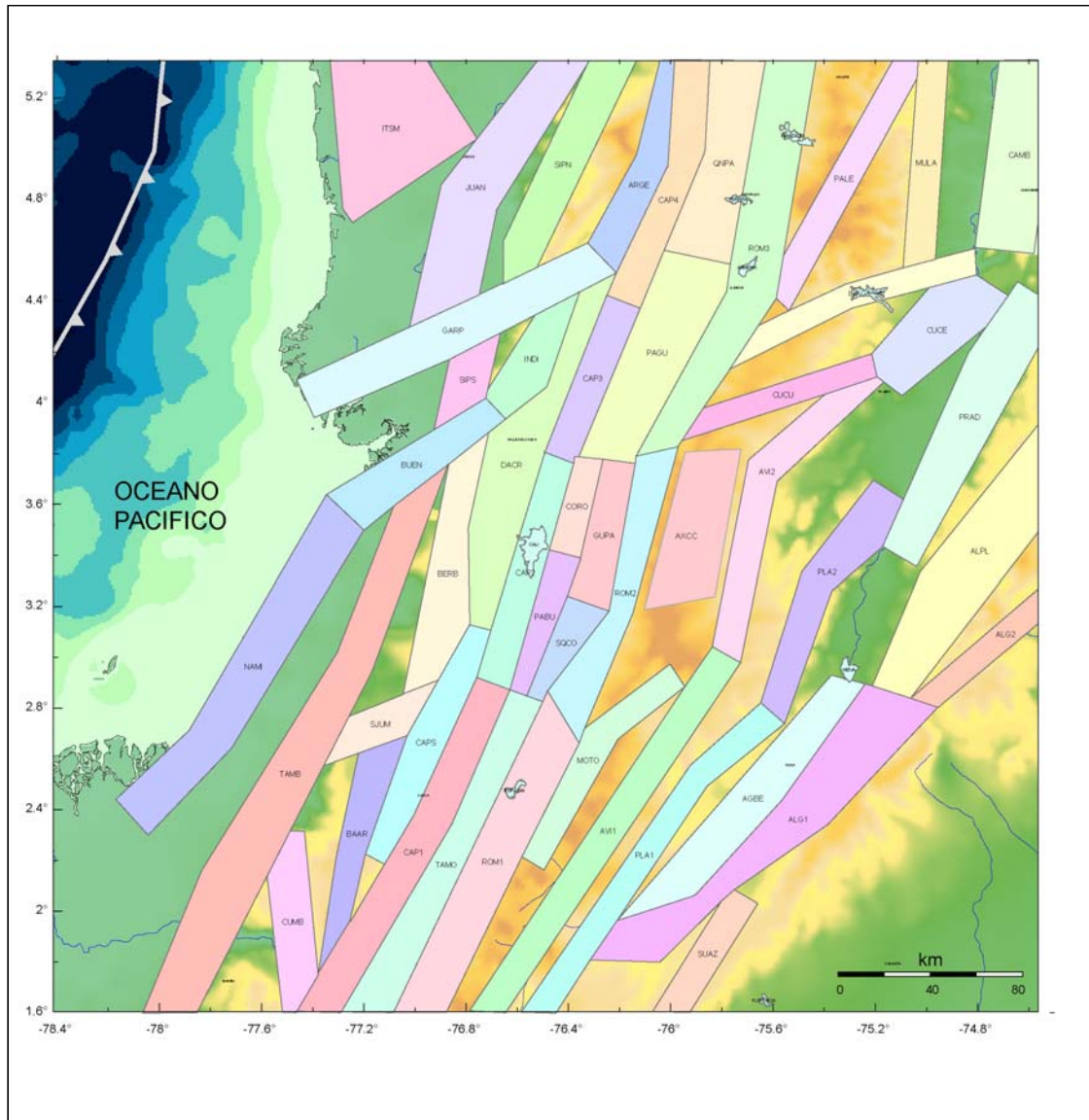


Figura 2. Fuentes sísmogénicas corticales definidas para la evaluación probabilística de la amenaza sísmica para la Ciudad de Cali.



3.1.2. Segmentación

En la práctica los criterios que más se utilizaron para delimitar las fuentes sismogénicas y establecer los segmentos de falla fueron: a) *geométricos*, particularmente la geometría de la traza de falla, cambios significativos de dirección e intersección de trazos de falla; b) *geológicos*, cambio significativos de litologías que afectan las fallas, contrastes litológicos por efectos de las fallas, presencia de cuerpos subvolcánicos emplazados en las zonas de falla, deformaciones visibles, (morfotectónicos, microtectónicos como estratigráficos), en los depósitos neógenos y cuaternarios; c) *geofísicos*, anomalías y gradientes gravimétricos y concentraciones significativas de sismicidad instrumental, entre otros.

A continuación se mencionan de W a E, las principales regiones estructurales y los segmentos de falla más destacados en cada una, exponiendo en forma resumida los criterios considerados en la hipótesis de segmentación presentada en el Informe de Investigaciones Neotectónicas en el Centro-Occidente Colombiano realizado por el proyecto (ver informe No.1.3, Subproyecto de Sismotectónica, Proyecto MZSCali, 2005).

En la Llanura del Pacífico el rasgo más importante para la segmentación esta alrededor de la bahía Buenaventura, al norte esta llanura tiene alrededor de 70 km de ancho mientras que al sur sólo presenta alrededor de 30 km. Este fuerte cambio en la línea de costa, asocia también fallas en sentido ENE-WSW, tales como la Falla Garrapatas y un trazo paralelo al sur nombrada falla Buenaventura. Asociado a estos segmentos transversales se postulan límites de segmentos. Al sur los segmentos de falla El Tambor y al norte lo que podría ser el segmento Uramita, que se expresa muy en cercanías del municipio de Sipi. En este sector se registra también una importante actividad sísmica.

La Cordillera Occidental, geoestructura orientada en general N25°E, se encuentra afectada en el tramo sur de su zona axial por fallas con direcciones N-S, limitadas por cambios de dirección y por trazos ENE-WSW, como el segmento de San Juan de Micay. En la parte media se encuentra afectada por la zona de fallas Dagua-Calima, que describe un arco cóncavo al oriente y cuya morfología indica que el bloque colgante al E se ha hundido, contrario a ciertas evidencias que indican una cinemática actual invertida igual que el frente oriental de la cordillera, definido por la gran zona de falla Cali-Patía. Los segmentos propuestos para la zona de falla de Cali-Patía están relacionados con los principales rasgos estructurales del valle del Cauca-Patía, de sur a norte son, el valle del Patía, el altiplano de Popayán, el valle del Cauca, entre el umbral subvolcánico de Santander de Quilichao y el máximo angostamiento del valle alrededor de Buga. Desde el angostamiento de Buga hacia el norte se diferencian dos segmentos con límites uno alrededor de Roldanillo (límite norte del ultramáfico de Bolívar) y el otro un poco al norte de la Virginia, donde el valle del Cauca cambia totalmente de patrón de drenaje.

En el Valle del Cauca-Patía las fallas se segmentaron igualmente conforme a las irregularidades morfoestructurales que presenta esta depresión interandina: a) en el valle del Patía, hasta la estructura transversal entre San Sebastián y la Sierra; b) en el altiplano de Popayán, hasta el sector de subvolcánicos de Santander de Quilichao; c) desde los subvolcánicos hacia el norte hasta la zona de Buga, en la cual ocurre el rasgo transversal ENE-WSW asociado en continuidad y dirección con la zona de falla de Cucuana; d) el



segmento más al norte corresponde a los contrastes morfoestructurales que marcan el río La Vieja y la depresión del abanico del Quindío.

La Cordillera Central presenta en su vertiente occidental una de las más importantes zonas de falla del país, documentada como Sistema de Fallas Romeral. Este sistema corresponde en general a tres fallas fundamentales de expresión sub-vertical, que buzan en general al E, estas son: Falla Cauca-Almaguer, Falla Silvia-Pijao y la Falla San Jerónimo. Los criterios generales para la segmentación del Sistema de Fallas Romeral (SFR) fueron los mismos ya mencionados para la Cordillera Occidental y para el Valle del Cauca-Patía. Los criterios específicos de sur a norte fueron: a) en el valle del Patía las fallas de Cauca Almaguer y Silvia Pijao, presentan rasgos atenuados o enmascarados (?) por las litologías que conforman este tramo de la cordillera; b) el altiplano de Popayán limitado al norte por la zona de subvolcánicos de Santander de Quilichao; c) un límite en el sector de Corinto donde el valle del Cauca alcanza su mayor amplitud, adicionalmente, en la cordillera se presenta interrupción en el afloramiento de unidades metamórficas y un cambio importante en la dirección (de NE a N-S) de las trazas de estas fallas; d) un límite en el sector asociado al angostamiento del valle (Bugá) y la proyección hacia el W de la zona de falla de Cucuana; e) un límite asociado a la depresión del Abanico del Quindío y a la intersección de la falla de San Jerónimo con la falla de Palestina. Adicionalmente en el eje de la Cordillera Central ocurren varias fallas que la afectan en sentido transversal (ENE-WSW), tales como las fallas Toez, Cucuana, Ibagué y Palestina. Estos segmentos pueden afectar toda la cordillera, como en el caso de la falla de Ibagué que desplaza en sentido lateral derecho el frente oriental de la Cordillera.

En la vertiente oriental de la Cordillera Central están los segmentos de falla con expresión subvertical de los planos que delimitan bloques levantados en la cordillera y hundidos hacia el Valle del Magdalena, cuya vergencia es principalmente al oriente. La Cordillera Central está separada tectónicamente del Valle Superior del Magdalena por el Sistema de Fallas de La Plata-Chusma en el Departamento del Huila y sur del Tolima. Este límite constituye una fuerte expresión morfológica que en general marca la presencia de rocas metamórficas, ígneas intrusivas y volcanoclásticas al W y rocas volcanoclásticas y sedimentarias al E.

En el Valle del Magdalena las fallas presentan orientaciones NE, conforme a la estructura del valle. Los límites de segmentos activos se han relacionado a estructuras de dirección NW-SE, que inducen cambios en la dirección en las trazas de falla, haciendo que la componente direccional se destaque con relación a la componente inversa. Un ejemplo de esto es la falla Agrado-Betania en cuyo extremo sur presenta la componente direccional más desarrollada.

La Cordillera Oriental en el sector de interés al proyecto, limita con el valle del Magdalena a lo largo de las fallas de Algeciras Sur, Potrerillos, Baraya y Prado al norte. Estas fallas presentan vergencia al W, con expresión que va desde subvertical al sur (Algeciras) a poco inclinadas (45° al E) al norte. La propuesta de segmentación en este sector esta controlada .

En la **Tabla 1** se presentan los segmentos asociados a cada fuente organizadas conforme a la región estructural donde se encuentran, manteniendo el orden de presentación en el texto (de occidente a oriente). Los segmentos están relacionados con el código utilizado en el Mapa MZSC - N2 (ver informe No.1.3, Subproyecto de Sismotectónica, Proyecto MZSCali, 2005).

Tabla 1. Fuentes Sismogénicas definidas a nivel cortical y segmentos asociados.

Región-Estructura	FUENTE	Segmentos asociados	Región-Estructura	FUENTE	Segmentos asociados
Llanura del Pacífico	ITSM	JR79, JR80, ITS1	Cuenca Cauca-Patía	GUPA	GUP1
	JUAN	ITS2, 20JA		PAGU	PAB2, GUP2
	SIPN	19JA, SEG7		QNPA	QNPA
	ARGE	ARGE	Cordillera Central - Flanco W	ROM1	CAA1, CAA2, SJE1, SJE2, SIP1, SIP2, POPA
	GARP	GRPW, GRPE		ROM2	CAA3, CAA4, SJE4, SJE3, SIP3
	SIPS	JR74		ROM3	CAA6, SIP5, SJE6, CAA5, SIP4, SJE5
	INDI	17JA		Cordillera Central - Flanco E	MOTO
	BUEN	BUEN	AVI1		AVI1, COLO
	NAMI	NAMI, RECH	AVI2		AVI2, SACO
	TAMB	TAMB, TAMS, 71JR	CUCU		CUCW
Cordillera Occidental	CUMB	JR63	IBAG		COCO, IBAG
	BAAR	BAAR	PALE		PAL1, PAL2
	SJUM	SJUM	MULA		MULA
	CAPS	LICA, CAPI	PLA1		PLA1, SEG88
	BERB	AGUA	PLA2		PLA3, PLA2
	DACR	BEBR, DACA	AGBE		AGBE
	CAP1	CAP2, CAP1	CUCE	DOIM, CUCE	
	CAP2	CAP3	SUAZ	SUAZ	
	CAP3	SANT, CAP4	Cordillera Oriental - Flanco W	ALG1	PORI, ALG1
	CAP4	CAP5, MIST		ALG2	ALG2
Cuenca Cauca-Patía	TAMO	TAM2, TAM1		ALPL	BARA, ALPL
	PABU	PAB1		PRAD	PRA1, PRA2
	SQCO	SQCO	CAMB	CAMB, SEG19	
	CORO	CORO	C. Central	AXCC	

3.1.3. Fuentes sismogénicas asociadas a la subducción de la placa oceánica

Asociadas al proceso de subducción se definieron dos tipos de fuentes: una asociada a la sismicidad interplaca (zona de contacto entre la corteza oceánica y la corteza continental) y otra a la sismicidad intraplaca (en la corteza oceánica subducida). La geometría de la primera se definió a partir de un análisis integrado de la geometría de la fosa con rasgos topográficos en la placa oceánica y la distribución de la sismicidad actual e histórica y los mecanismos focales. La geometría de la segunda se definió a partir de la distribución de la sismicidad con la profundidad (zona de Benioff).

Los detalles sobre la caracterización de la actividad de las fuentes asociadas a la subducción se presentan en el informe temático respectivo (ver informe No.1.6, Subproyecto de Sismotectónica, Proyecto MZSCali, 2005). Tres fuentes diferenciadas se asocian a la actividad interplacas y una a la intraplaca (**Figura 3**):

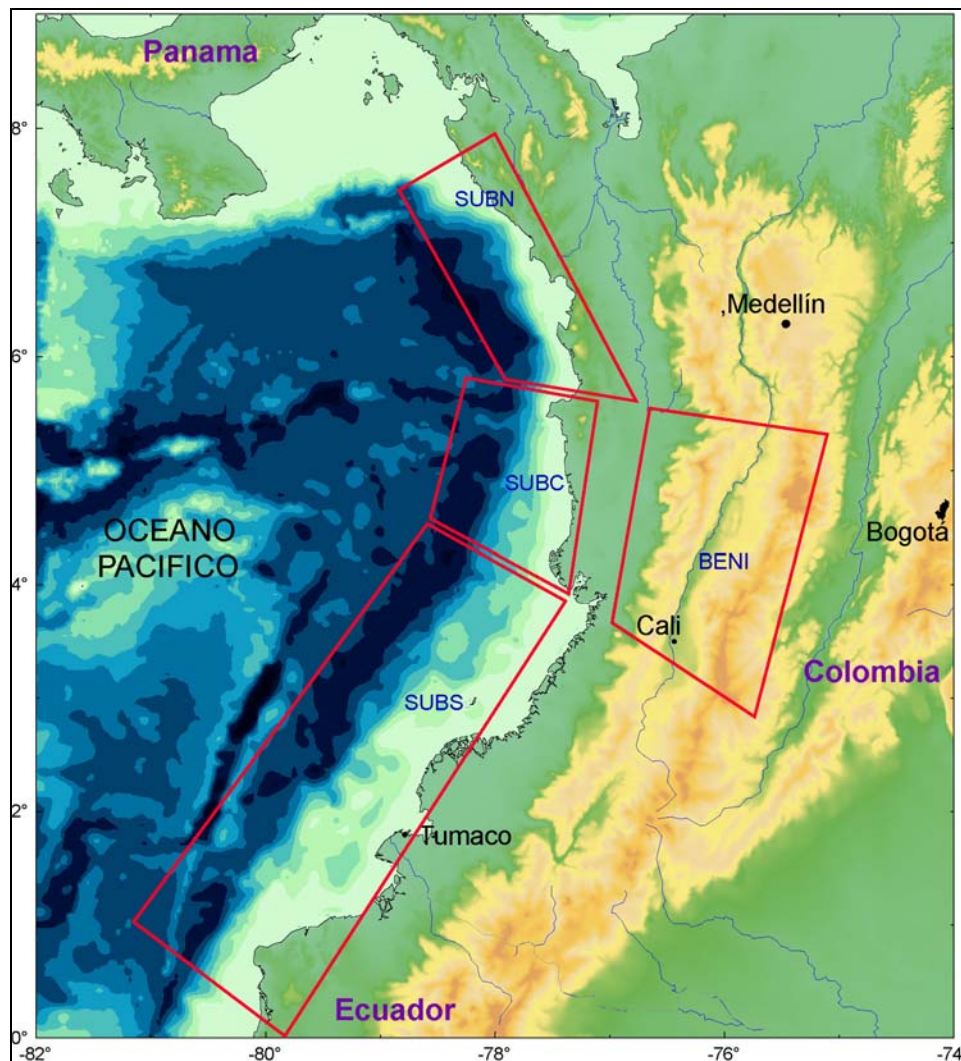


Figura 3. Fuentes sismogénicas de subducción definidas para la evaluación probabilista de la amenaza sísmica.



Subducción Norte. Segmento al norte de Cabo Corrientes, con una longitud de 170 km orientado a 310° de azimut, con plano de Benioff buzando 25° hacia los 40° .

Subducción Centro. Segmento localizado entre las latitudes de Buenaventura y cabo Corrientes, longitud a lo largo de la fosa de 160 km, orientado hacia los 20° , y un plano de subducción buzando 40° hacia los 110° .

Subducción Sur. Segmento localizado frente a las costas de Valle, Cauca, Nariño y norte del Ecuador, en un tramo de fosa orientado a 40° azimut y 550 km de longitud, con plano de Benioff buzando 30° hacia los 130° .

Zona de Benioff. Localizado a distancias entre 200 y 350 km de la fosa. La sismicidad de profundidad intermedia (70 a 200 km) define un plano de Benioff con $\sim 40^\circ$ de buzamiento.

3.2 RECURRENCIA SÍSMICA

La caracterización de la recurrencia sísmica incluye la construcción de la distribución de magnitudes, parámetro b (ó β), y de la tasa media anual de ocurrencia, parámetro a (ó α). Las relaciones de recurrencia que se obtienen en el Proyecto MZSCali se sustentan en la sismicidad observada histórica e instrumental que se ha recopilado en el Catálogo Sismológico del Occidente Colombiano. Especial atención se ha dado a la completitud del catálogo en función de la magnitud, la localización y el tiempo: además de la estimación de la "completitud" en rangos de unidades de magnitud para el catálogo general, se determinaron rangos de completitud específicos para cada fuente individual de manera que fuera válida la hipótesis de comportamiento del modelo exponencial truncado. De otra parte, para evaluar la ocurrencia de eventos independientes que requiere el modelo de Poisson se retiraron las réplicas y los escasos eventos premonitorios identificables en el catálogo (ver informe No.1.5, Subproyecto de Sismotectónica, Proyecto MZSCali, 2005).

Las relaciones de recurrencia requieren una estimación de los eventos que pueden asociarse a la fuente de interés. Esto generalmente no es posible para fuentes localizadas en zonas de baja sismicidad. Entonces, para la estimación de b se han adoptado distintos métodos según las características de la sismicidad:

- **Método 1 (MB1).** Cuando se puede asignar a la fuente un número suficiente de eventos en el rango "completo" de magnitudes se define un volumen de falla, por lo general un paralelepípedo al cual se asocian los sismos del rango "completo". En esta etapa se ha evitado el uso de corredores de falla asociados a una geometría tridimensional teniendo en cuenta las incertidumbres en las profundidades de los sismos del catálogo, del orden de 10-15 km para los sismos instrumentales recientes y alrededor de 20-30 km para los sismos históricos. Sin embargo el ancho del paralelepípedo si toma en consideración el buzamiento de la falla.
- **Método 2 (MB2).** Cuando la sismicidad asociada a la fuente no permite calcular b directamente, este valor se estima para una zona más extensa o con una actividad mejor definida, y se asume que el valor regional representa adecuadamente la distribución de magnitudes en la fuente (por la semejanza en la distribución de la simicidad, por el

ambiente tectónico, por la diferenciación con las regiones vecinas, entre otras). Las regiones que se definieron en esta etapa se presentan en la **Figura 4**. Para las fuentes a lo largo del Sistema de Fallas de Romeral se asumió el b promedio de ROMC1 y ROMC2.

- **Método 3 (MB3).** Para fuentes con baja actividad sísmica para las cuales se puede establecer analogía con otra fuente con base en criterios geológicos o sismológicos se asigna el valor de b de la fuente análoga.
- **Método 4 (MB4).** Para fuentes relativamente aisladas con baja actividad sísmica asociada se asumió el valor de b regional, calculado como el promedio de b para las fuentes en las que se utilizó el Método 1.

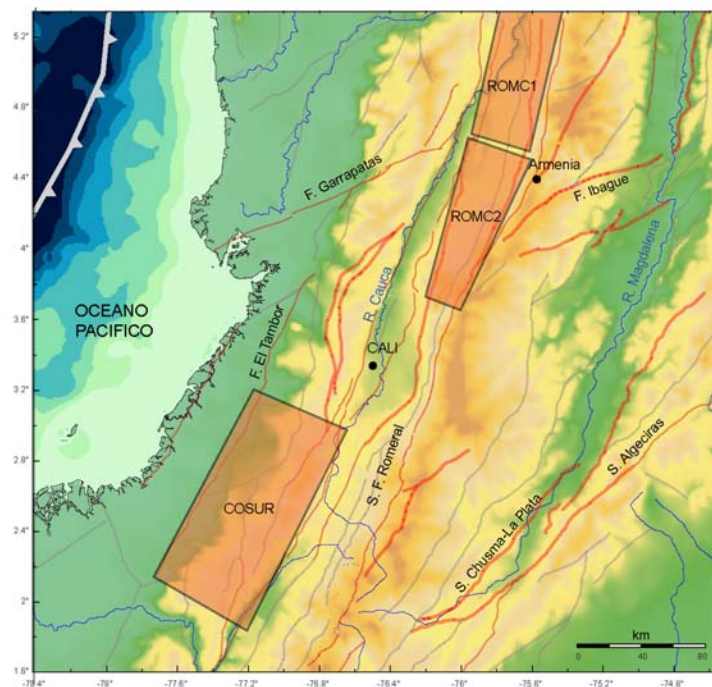


Figura 4. Regiones definidas para la estimación del parámetro b según criterio MB2.

Los cálculos de b se realizaron por el método de mínimos cuadrados y por el de máxima verosimilitud. Los ensayos iniciales muestran que las diferencias en el valor de b calculados por ambos métodos son pequeñas cuando las fuentes tienen una alta actividad sísmica asociada, como las fuentes asociadas a la subducción o al Sistema de Fallas de Algeciras-Altamira, mientras que para la mayoría de las fuentes corticales con menor actividad y escasa ocurrencia de sismos moderados o grandes las diferencias entre los dos métodos es importante. Los valores de b que se seleccionaron corresponden a los calculados por mínimos cuadrados por cuanto valora la relativamente buena información instrumental recopilada en el último decenio en el país. Dos grupos de trabajo independientes realizaron ambos cálculos y los valores que se presentan son el resultado de numerosas discusiones en el grupo respecto a los métodos de cálculo, la interpretación de los datos y las hipótesis de trabajo.

Las tasas de ocurrencia se calcularon para la magnitud mínima de 4.0, fijando el valor de b determinado previamente y haciendo un ajuste por mínimos cuadrados a las tasas de sismicidad observadas para cada fuente (**Método MA1**). En pocos casos no es posible asignar sismos a las fuentes. Estos corresponden a las fuentes en el sector sur de la Cordillera Occidental. Para ellas la tasa de ocurrencia se asignó a partir de la sismicidad asociada a una región más amplia (COSUR) y se dividió proporcionalmente a la longitud de falla (**Método MA2**).

A manera indicativa también se calculó la tasa de ocurrencia anual para $M=4.0$ a partir de la tasa de movimiento de las fallas según el método planteado en el Numeral 2.2.3 (**Método MA3**). Este método requiere, además de la tasa de movimiento, las dimensiones de la falla, el valor de β y el de M_{max} (m_u). Estas tasas de ocurrencia se calculan a manera indicativa teniendo en cuenta que las incertidumbres en las tasas de movimiento estimadas son considerables: por lo general, se especifican rangos de tasas de movimiento o límites superiores y no valores específicos, no se indica la componente del movimiento (horizontal, vertical o total), se trata de estimados gruesos que, por lo general, carecen de soporte en datos detallados o se refieren a sectores de falla muy localizados (puntuales) y no a un promedio a lo largo de la falla. Sin embargo estos datos son importantes a considerar especialmente para aquellas fuentes donde la expresión sismológica es limitada.

3.3 MAGNITUDES MÍNIMA Y MÁXIMA

La magnitud mínima (m_o) seleccionada para todas las fuentes en el Proyecto MZSCali es 4.0, que si bien es relativamente baja respecto a movimientos del terreno, se considera la mínima de interés para los propósitos ingenieriles del estudio.

En el Proyecto MZSCali se han adoptado distintos métodos para la estimación de la magnitud máxima (m_u) de las fuentes corticales, dependiendo de la disponibilidad de datos:

- **Metodo 1 (MM1).** Para las fuentes de corteza está basado en la máxima longitud de ruptura en superficie estimada a partir de criterios morfotectónicos. La longitud de los segmentos determinados en el Numeral 3.1 define el *límite superior* de la magnitud máxima asociada a un segmento, si se asume el escenario de ruptura total (100%) del segmento en un solo evento. Según la ecuación (2) en este escenario las magnitudes máximas serían mayores que 7.0 para casi todos los segmentos, excepto aquellos con longitud menor que 45 km. Como se mencionó en el Numeral 2.2.2 se ha observado en el mundo que las zonas de falla, especialmente las más extensas, no se rompen a lo largo de toda su longitud durante un solo sismo, por ello en este trabajo, además de la longitud del segmento, se han buscado criterios morfotectónicos adicionales para constreñir el tamaño máximo de la ruptura. En los casos en los que se observaron estos indicios o evidencias adicionales, la longitud de ruptura se estimó a partir de la extensión de los rasgos geomorfológicos y la magnitud se calculó según la ecuación (2). En dos casos (DACR y PABU) la magnitud se calculó a partir del desplazamiento en superficie según la ecuación (3). Algunas de las fuentes donde se utilizó este procedimiento se ejemplifican a continuación.

Ciertos rasgos lineales, contrastes morfológicos fuertes y alteraciones de geoformas típicas se han reconocido y documentado como evidencias del afloramiento de superficies de rupturas cosísmicas (**Tabla 2**). Por ejemplo, el trazo de la falla de Algeciras se expresa mediante una línea recta que vincula tramos rectos de drenaje, cuencas y líneas escarpes, entre otros. Un segundo ejemplo se presenta en la vertiente W de la Cordillera Central entre las poblaciones de Corinto y Pradera donde se observa una serie de abanicos que presentan evidencias de deformación por surgimiento del plano de falla que corta la superficie del terreno que estos definen; la continuidad de estos rasgos nos ha permitido asumir como hipótesis de ruptura el tramo recto del frente de piedemonte entre las poblaciones de Corinto y Pradera, que define una longitud de ~27 km, y se ha utilizado como longitud de una posible ruptura. Otro ejemplo análogo, en el cual se asume un frente homogéneo de deformación, es el frente de avance (20 km) que se define entre las poblaciones de Buga y San Pedro, el cual hace parte de un frente de cabalgamiento (Alfonso, 1993) con vergencia al W, donde se han reportado rasgos de actividad en sus extremos (López y Moreno-Sánchez, 2005; López *et al.*, 2004).

De igual manera se midieron también rasgos rectos interpretados como ruptura sísmica dentro de la zona de Falla Cali-Patía en el sector de Vijes. Estos rasgos son especialmente claros en los modelos digitales de elevación con definición de *pixel* de 90 m (**Figura 5**). En la parte sur de la Cordillera Occidental, donde el acceso fue imposible, también se recurrió a este método sobre el mismo modelo digital (**Figura 6**). Esta aproximación a la longitud de ruptura se basa en la definición de anomalías del relieve, propuestas sobre estas imágenes y por tanto tienen un nivel de incertidumbre importante. Por tanto se utilizan sólo en los casos en los que no existe más información disponible.

- **Metodo 2 (MM2).** La magnitud del máximo sismo registrado en el catálogo de sismos que pueda asociarse a determinada fuente o a una que guarde similitud tectónica se usa como referencia para asignar m_u . En algunos casos se juzgó que el sismo histórico representaba adecuadamente m_u , como en el segmento sur de la subducción (zona interplaca) y la fuente asociada al Sistema de Fallas de Algeciras. En otros casos éste se tomó como límite mínimo de la magnitud máxima y a m_u se asignó el valor del sismo histórico más 0.2.
- **Metodo 3 (MM3).** Para algunas fuentes sismogénicas en la corteza continental donde no fue posible establecer límites físicos a las posibles rupturas, m_u se asignó como un sismo flotante cuya magnitud de 6.9 se ha establecido a partir del examen de la actividad histórica de la zona andina (ver informe No.1.7, Subproyecto de Sismotectónica, Proyecto MZSCali, 2005). Este valor es mayor que el de los sismos históricos corticales registrados en la zona de influencia del Proyecto MZSCali, excepto aquellos relacionados con el Borde Llanero. Para las fuentes cuya longitud es menor que la esperada para un sismo de 6.9 según la ecuación (2), se ha asignado a m_u el valor de 6.7.

Tabla 2. Estimación de la magnitud máxima de acuerdo con criterios neotectónicos (método MM1).

FUENTE	SEGMENTO	NOMBRE SEGMENTO	Longitud de Ruptura	Criterio Ruptura	Mmax Mw ⁽³⁾
GARP	GRPE	GARRAPATAS E	22 +/- 1,5 ⁽¹⁾	Longitud de rasgo rectilíneo en el extremo W del segmento, identificado en el MDE ⁽⁴⁾	6,6 a 6,7
INDI	17JA	SINDIO	16,5 +/- 2,5 ⁽¹⁾	Longitud de rasgo rectilíneo identificado en el MDT (NASA, 90 m)	6,4 a 6,6
CAPS	CAPI	CAPITANES	19,5 +/- 1 ⁽¹⁾	Longitud de rasgo rectilíneo en el extremo W del segmento, identificado en el MDE ⁽⁴⁾	6,5 a 6,6
DACR	DACA	DAGUA-CALIMA	1,7 +/- 0,1 ⁽²⁾	Desplazamiento lateral izquierdo calculado a partir del salto vertical neto, en falla secundaria de la zona de falla Dagua-Calima. Trinchera Loboguerrero. Tomado de WCC, 1983	6,8 a 6,9
CAP2	CAP3	CALI-PATÍA3	21 +/- 1,7 ⁽¹⁾	Longitud rasgo rectilíneo identificado en el MDE ⁽⁴⁾	6,6 a 6,7
CAP3	SANT	SANTANA	17 +/- 1,7 ⁽¹⁾	Longitud de rasgo rectilíneo en el tramo entre Vijos y Media Canoa, identificado en el MDE ⁽⁴⁾	6,5 a 6,6
SQCO	SQCO	SANTANDER-CORINTO	11 +/- 1,5 ⁽¹⁾	Sumatoria de rasgos de ruptura, escarpes identificados sobre fotografías aéreas y agrupados por zona de falla.	6,2 a 6,4
CORO	CORO	COROSO	1 /3 Longitud	Longitud de la falla inferida por geofísica	6,4
GUPA	GUP1	GUAVAS-PRADERA1	21 +/- 1,8 ⁽¹⁾	Sumatoria rasgos de ruptura, escarpes cuaternarios identificados en fotos aéreas y agrupados por zona de falla.	6,6 a 6,7
PAGU	PAB2	PALMIRA-BUGA2	1,5 ⁽²⁾	Salto de falla medido en afloramiento, sobre la carretera variante de Tulua.	6,8
ROM2	CAA4	CAUCA-ALMAGUER4	14 +/- 1,5 ⁽¹⁾	Longitud de rasgo rectilíneo, interpretado como ruptura por el contraste geomorfológico, identificado en el MDE ⁽⁴⁾	6,4 a 6,5
IBAG	IBAG	IBAGUE		Paleosismología, INGEOMINAS, 2004 (Montes et al, 2004)	7,0

⁽¹⁾ km de longitud

⁽²⁾ m medidos en afloramiento y en trinchera de exploración paleosismológica

⁽³⁾ Magnitud calculada según las ecuaciones (2) y (3)

⁽⁴⁾ MDE: Modelo digital de elevación de la Shuttle Radar Topography Mission (STRM), con resolución de 90 m (NASA-NGA National Geospatial Intelligence Agency).

Magnitud máxima asociada a las fuentes de subducción

Para las fuentes interplaca la magnitud máxima se calculó por tres métodos diferentes, uno basado en el potencial sísmico (Ruff y Kanamori, 1980), y dos más en la longitud de ruptura (Dorbath *et al.*, 1990; Dimaté *et al.*, 2005), **MM1**. Finalmente se seleccionó el valor obtenido a partir de la longitud promedio del segmento, L , a partir de la fórmula de Dimaté *et al.* (2005) derivada a partir de datos colombianos:

$$M_w = 1.77 \log L + 3.9 \quad (11)$$

Dado que con el aumento de la profundidad se modifica el comportamiento frágil de los materiales y que la magnitud de los terremotos depende más de su reología que del contexto geodinámico, y ante la carencia de información experimental que permita establecer relaciones para estimar las magnitudes máximas se utilizó la estrategia de la analogía para estimar la magnitud máxima asociada a la zona de Benioff (ver informe No.1.6, Subproyecto de Sismotectónica, Proyecto MZSCali, 2005). En este caso se recurrió a magnitudes calculadas a partir de información instrumental registrada en todo el mundo, considerando los terremotos con profundidad entre 60 y 300 km (**MM3**). Para sismos en este rango de profundidad el análisis muestra en tiempos recientes una magnitud máxima de $M_w = 8.1$ (22/06/1977) asociada a la subducción en la región de las Islas Tonga en el Pacífico Occidental. Para Suramérica la magnitud máxima la registra el terremoto del 31/05/1970 en el Perú, con $M_w = 7.9$. Para el Proyecto MZSCali, se asumió una magnitud máxima $M_w = 7.8$, valor 0.6 grados superior al máximo registrado en Colombia para esta zona (23/11/1979, $M_w = 7.2$).

3.4 SÍNTESIS DEL MODELO SISMOTECTÓNICO

El modelo sismotectónico para el cálculo de la amenaza sísmica probabilista para la ciudad de Cali se presenta en el Mapa MZSC - ST1, conformado por 52 fuentes sísmicas, 47 asociadas a fallas o segmentos de falla corticales, una asociada a una zona de sismicidad difusa (AXCC) y cuatro asociadas al proceso de subducción. Las características de la actividad sísmica de cada fuente se describen por los parámetros b , a_{min} , y M_{max} y se presentan en la **Tabla 3** junto con los métodos más relevantes para definirlos. En la **Tabla 3**, b corresponde al parámetro de distribución de magnitudes del modelo exponencial truncado, $Ao(sis.)$ a la tasa de excedencia de la magnitud mínima calculada a partir de datos sismológicos, $Ao(tec.)$ a la tasa de excedencia de la magnitud mínima calculada a partir de datos tectónicos, M_{max} a la magnitud máxima M_w estimada, *Met. b*, *Met. Ao (sis)*, *Met. Ao (tec.)* y *Met. M_{max}* a los métodos utilizados para asignar cada uno de estos parámetros según el texto precedente. Las gráficas correspondientes a la estimación de b y a_{min} a partir de datos sismológicos para cada una de las fuentes sismogénicas definidas se presentan en el Anexo 1.



Tabla 3. Parámetros de Tasa Sísmica de las fuentes definidas en el Modelo Sismotectónico para el Proyecto MZSCali (ver Figura 2).

NOMBRE FUENTE	CODIGO	b	Ao (sis.)	Ao (tec.)	Mw máx	Método b	Método Ao (sis.)	Método Ao (tec.)	Método Mmáx
F. Agrado-Betania	AGBE	0.87	0.16	0.15	6.9	MB1	MA1	MA3	MM3
F. Algeciras, sector Sur	ALG1	1.10	0.39	1.48	7.4	MB1	MA1	MA3	MM2
F. Algeciras, sector Norte	ALG2	1.00	0.13		7.4	MB1	MA1		MM2
F. Altamira-Platanillal	ALPL	1.13	0.18		7.3	MB1	MA1		MM2
F. Argelia	ARGE	0.94	0.03	0.06	6.9	MB3	MA1	MA3	MM3
F. Avirama, sector Sur	AVI1	0.90	0.05		6.9	MB4	MA1		MM3
F. Avirama, sector Norte	AVI2	0.90	0.09		6.9	MB4	MA1		MM3
Zona Axial Cordillera Central	AXCC	0.90	0.16		6.9	MB4	MA1		MM3
F. Balboa-Argelia	BAAR	0.70	0.02		6.9	MB2	MA2		MM3
F. Bellavista-Río Bravo	BERB	0.88	0.06		6.9	MB1	MA1		MM3
F. Buenaventura	BUEN	0.84	0.16		6.9	MB1	MA1		MM3
F. Cambao, segmento Sur	CAMB	0.91	0.33	0.11	6.9	MB1	MA1	MA3	MM2
S. F. Cali-Patía, sector Sur	CAP1	0.90	0.06		6.9	MB4	MA1		MM3
S. F. Cali-Patía, sector Cali	CAP2	0.90	0.06		6.7	MB4	MA1		MM1
S. F. Cali-Patía, sector Río Frio	CAP3	1.10	0.06		6.6	MB1	MA1		MM1
S. F. Cali Patía, sector Norte	CAP4	0.90	0.09	0.07	6.9	MB4	MA1	MA3	MM3
F. Capitanes	CAPS	0.70	0.02		6.6	MB2	MA2		MM1
F. Corozo	CORO	0.88	0.01		6.4	MB2	MA1		MM1
F. Cucuana, segmento Este	CUCE	0.93	0.08		6.9	MB3	MA1	MA3	MM3
F. Cucuana, segmento Oeste	CUCU	0.93	0.04	0.04	6.9	MB1	MA1	MA3	MM3
F. Cumbitara	CUMB	0.90	0.01		6.9	MB4	MA1		MM3
F. Dagua-Calima	DACR	0.94	0.08	0.09	6.8	MB1	MA1	MA3	MM1
F. Garrapatas	GARP	0.94	0.21	0.13	6.7	MB1	MA1	MA3	MM1
F. Guavas-Pradera	GUPA	0.88	0.05	0.10	6.7	MB2	MA1	MA3	MM1
F. Ibaqué	IBAG	0.93	0.05	0.38	7.0	MB3	MA1	MA3	MM1
F. El Indio	INDI	0.88	0.06		6.6	MB1	MA1		MM1
Fallas de Itsmina	ITSM	0.90	0.02		6.9	MB4	MA1		MM3
F. San Juan	JUAN	0.78	0.21		6.9	MB1	MA1		MM3
F. Móráz-Tóez	MOTO	0.68	0.05		7.0	MB1	MA1		MM2
F. Mulatos	MULA	0.90	0.02	0.05	6.9	MB4	MA1	MA3	MM3
S. F. Naya-Micay	NAMI	0.90	0.03	0.19	6.9	MB4	MA1	MA3	MM3
F. Palmira-Buga	PABU	0.88	0.02		6.9	MB2	MA1		MM3
F. Palmira-Guabas	PAGU	0.88	0.19		6.7	MB2	MA1		MM1,MM2
F. Palestina	PALE	0.90	0.01	0.07	6.9	MB4	MA1	MA3	MM3
S. F. Chusma-Plata, sector Sur	PLA1	0.85	0.09	0.16	6.9	MB2	MA1	MA3	MM3
S. F. Chusma-Plata, sector Norte	PLA2	0.85	0.02	0.10	6.9	MB2	MA1	MA3	MM3
F. Prado	PRAD	0.90	0.05		6.9	MB4	MA1		MM3
F. Quebradanegra-Patía	QNPA	0.88	0.04		6.9	MB2	MA1		MM3
S. F. Romeral, sector Sur	ROM1	0.93	0.80	2.13	6.6	MB1	MA1	MA3	MM2
S. F. Romeral, sector Centro	ROM2	0.88	0.04		6.5	MB2	MA1		MM1
S. F. Romeral, sector Norte	ROM3	0.88	0.09	0.11	6.9	MB2	MA1	MA3	MM3
F. Sipi, segmento Norte	SIPN	0.70	0.14		6.9	MB1	MA1		MM3
F. Sipi, segmento Sur	SIPS	0.78	0.03		6.7	MB3	MA1		MM3
F. San Juan de Micay	SJUM	0.70	0.01		6.7	MB2	MA2		MM3
F. Santander Quilichao – Corinto	SQCO	0.88	0.01		6.4	MB2	MA1		MM1
F. Suaza	SUAZ	0.90	0.04	0.07	6.9	MB4	MA1	MA3	MM3
F. Tambor	TAMB	0.70	0.07	0.07	6.9	MB2	MA2	MA3	MM3
F. Taminango-Morales	TAMO	0.93	0.02		6.9	MB3	MA1		MM3
Zona de Benioff, segmento Centro	BENI	0.74	5.23		7.8	MB1	MA1		MM3
Zona de Subducción, segmento Sur	SUBS	0.98	15.21		8.8	MB1	MA1		MM2
Zona de Subducción, segmento Norte	SUBN	0.84	5.75		7.8	MB1	MA1		MM1
Zona de Subducción, segmento Centro	SUBC	0.83	3.42		7.8	MB1	MA1		MM1



CAPITULO 4

DISCUSION

La caracterización de la actividad sísmica de fuentes sismogénicas que pueden afectar la ciudad de Cali que se presenta en este informe, responde a los requerimientos del método probabilístico de Cornell (1986) para la estimación de la amenaza. La aproximación que se ha seguido en el estudio es clásica, tomando la contribución de datos provenientes del análisis neotectónico y de la sismicidad histórica e instrumental, enmarcados en el contexto tectónico regional, con el fin de contar con una escala amplia de observación temporal y también mejorar la resolución espacial, necesarias para tener una muestra confiable de la actividad sísmica y de la actividad de las fuentes. A lo largo de los diversos estudios en los que se basa la presente caracterización, se ha puesto especial énfasis en hacer explícitos los elementos (datos, contextos, métodos, juicios) que han contribuido a los resultados y en las incertidumbres y limitaciones que conllevan. Esta es, tal vez, la contribución más importante desde el punto de vista metodológico.

El estudio previo más completo respecto a la caracterización de la actividad sísmica en el occidente colombiano es el Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia, EGASC (AIS, INGEOMINAS, Uniandes, 1996). Desde el punto de vista del modelo empleado para caracterizar la actividad, este último y el que se asumió en el Proyecto MZSCali son semejantes. Las diferencias importantes, que justifican que en ambos estudios se identifiquen fuentes sismogénicas diferentes y se obtengan parámetros de actividad distintos, radican en el tipo de información que se utilizó, los elementos de juicio empleados en los casos de carencia de información directa y el grado de detalle del estudio.

En cuanto a información nueva lo más sobresaliente son los datos más finos aportados por 10 años de observación de la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC, INGEOMINAS) que han permitido una diferenciación más nítida de las fuentes sismogénicas y una asignación de tasas de actividad más confiables para algunas zonas sismogénicas. También las imágenes remotas y los modelos digitales de elevación han aportado en la delimitación de las fallas regionales, en destacar los cambios geométricos e intersecciones de los trazos de falla y en evidenciar la continuidad de las deformaciones a lo largo de varios segmentos.

La identificación de las fuentes sismogénicas corticales se fundamentó en la síntesis de cartografía geológica existente en varias escalas, en la evaluación de los indicios y evidencias geomorfológicas de actividad reportados en la literatura y la realización de apiques en sitios de referencia. Comparado con el EGASC, el resultado es un mayor número de fuentes asociadas a fallas activas, segmentadas y que cubren prácticamente la zona andina.

Con tal distribución de fuentes y con la indicación de los análisis sismológicos de incertidumbres de ~10 km en la profundidad de los eventos mejor localizados del catálogo sismológico, el problema de asignación de eventos a fuentes deja de ser relevante. Una geometría simple de fuentes como paralelepípedos rectos para la asignación de eventos y



de polígonos alargados asociados a segmentos de falla, enterrados a la profundidad característica de la sismicidad cortical para el cálculo de la amenaza, se ajustan bien a la precisión de los datos disponibles.

En la caracterización de fuentes sísmicas asociadas a la subducción de la Placa de Nazca bajo Suramérica, en el estudio correspondiente del Proyecto MZSCali se realizó un análisis integrado de la información sismológica (única considerada en el EGASC), batimétrica y morfológica para la identificación de segmentos máximos posibles de ruptura. Además de esto, la revisión de numerosos trabajos que reconocen una segmentación longitudinal de la zona de subducción, asociada básicamente a cambios en la geometría de la placa subducida, nos llevó a proponer una segmentación longitudinal en las fuentes asociadas a la subducción y también a acotar su extensión en área, aspecto este que tiene implicaciones fundamentales en el grado de acoplamiento de las placas y en el proceso de acumulación de momento sísmico. Por tratarse de una fuente con una tasa alta de recurrencia y capaz de generar sismos de gran magnitud, se espera que la segmentación de la subducción, en contraste con una única fuente en el EGASC, tenga una influencia importante en la evaluación de la amenaza al limitar la ocurrencia de sismos con $M_w \geq 8$ únicamente al segmento sur.

La evaluación del parámetro de distribución de magnitudes (parámetro b) y de la tasa de actividad se sustenta en la información del catálogo sismológico (instrumental e histórica). En la investigación correspondiente de este proyecto, se ha hecho una recopilación concienzuda de la información de varios catálogos sísmicos existentes, un estudio bien documentado de la sismicidad histórica regional que ha afectado a la ciudad de Cali, se ha transformado el tamaño de los sismos a una sola escala de magnitud (M_w) y se han evaluado los periodos en el catálogo para los cuales un rango de magnitud está bien registrado (completitud). De tal manera que para la evaluación de los parámetros se toman en cuenta solamente aquellas magnitudes bien registradas en los distintos periodos. A cambio de cortar el catálogo a partir de un año determinado como en el EGASC, esta es otra manera de manejar las distintas calidades y resolución de la información en él contenida, manteniendo un cubrimiento temporal amplio.

A pesar del esfuerzo de recopilación, se reconoce la carencia de información para evaluar la actividad sísmica de algunas de las fuentes identificadas, bien por un registro pobre de actividad microsísmica, por la ausencia de actividad histórica o por tasas de movimiento de la falla pobremente determinadas. Antes que evaluar la actividad a partir de datos muy pobres, en este caso el Proyecto MZSCali recurrió primero al análisis sismotectónico tratando de ubicar regionalmente ambientes análogos para asignar valores de a ó b , o al análisis continental o global para evaluar las magnitudes máximas. El resultado del manejo del catálogo y del análisis sismotectónico son valores para b de alrededor de 0.9 con incertidumbres de ± 0.15 , en el rango de los observados mundialmente entre 0.7 y 1.2. Si se comparan con los del EGASC, en su mayoría cercanos a 0.5 con incertidumbres que pueden ser de ± 0.5 , la diferencia es importante. Valores tan bajos como 0.5 son difíciles de interpretar e implican una amenaza mayor en cuanto las fuentes tienden a liberar el momento acumulado en mayor proporción de sismos grandes.



En cuanto los criterios que han servido para asignar las magnitudes máximas en ambos estudios, el EGASC y el Proyecto MZSCali son muy distintos, es de esperar que las magnitudes también lo sean. Las diferencias más notables en las fuentes corticales son la del sector sur de la falla de Romeral y en la Falla Frontal de la Cordillera Oriental. A la falla de Romeral se le asigna una magnitud última de 7.6 (M_s) en el EGASC y una máxima de 6.9 en el Proyecto MZSCali; según la ecuación (2) el primer valor implicaría una ruptura de alrededor de 150 km de longitud en un solo evento. A la Falla Frontal se asigna 8.0 (M_s) en el EGASC (ruptura de ~330 km en un solo evento) y 7.4 en el presente estudio.

Dado que las diferencias en el número y la extensión de las fuentes y en la caracterización de su actividad sísmica no son siempre en un sentido (por ejemplo, siempre mayores en uno de los estudios), no se puede inferir *a priori* cual será el efecto final en las aceleraciones del terreno resultantes y solamente el cálculo directo y las comparaciones fuente a fuente mostrarán la sensibilidad de la amenaza respecto a variaciones en los parámetros de actividad. Es necesario resaltar que, si bien es cierto que, la caracterización que se ha hecho en este estudio representa un avance respecto a estudios anteriores, subsisten aún vacíos de información incluso para aplicar los modelos más sencillos. Los aspectos que sería necesario abordar a corto plazo tienen que ver con: a) el desconocimiento de la geometría de las estructuras mayores cercanas a Cali y la necesidad de elaborar secciones de referencia neotectónicas para evaluar las tasas de actividad, b) la falta de uniformidad en la estimación de las intensidades y la limitación en los datos históricos de soporte, c) el estudio detallado de sismos mayores registrados instrumentalmente y que sirvan como referencia para interpretar los datos históricos.



CAPITULO 5

BIBLIOGRAFIA

Abrahamson, N., 2001. Basic elements of probabilistic hazard assessment. Pegasus Project, Workshop No.1.

Arcila y Dimaté, 2005. Caracterización de fuentes sísmicas de subducción. *Informe No.1.6. Proyecto Microzonificación Sísmica de Cali*. INGEOMINAS.

Budnitz, R.J., Apostolakis, G., Boore, D.M., Cluff, L.S., Coppersmith, K.J., Cornell, C.A., and Morris, P.A., 1997. Recommendations for Probabilistic Seismic Hazard Analysis: Guidance on Uncertainty and Use of Experts. Nuclear Regulatory Commission. *Main report*, pp 51-82. Published by Lawrence Livermore National Laboratory.

Coppersmith, 1991. Seismic source characterization for engineering seismic hazard analysis: *Proceedings, Fourth International Conference on Seismic Zonation*, Stanford, California, **1**, 60 pp.

Cornell, C. A., 1968. Engineering seismic risk analysis, *Bull. Seis. Soc. Am.*, **58**, 1583-1606.

dePolo C. M. and Slemmons, D. B., 1990. Estimation of earthquake size for seismic hazards. *In: Krinitzky, E. L., and Slemmons, D. B., Neotectonics in earthquake evaluation*, Boulder, Co., *GSA, Reviews in Engineering Geology*, **VIII**,1-28. GSA.

Dimate, C. , Rivera, L. , Cisternas, A., 2005. Re-visiting large historical earthquakes in the Colombian Eastern Cordillera. *Jour. Seism.*, **9**, 1-22.

Dimaté, C. y Pérez, J., 2005. Actualización del Catálogo de Sismos del Occidente Colombiano. *Informe No.1.5. Proyecto Microzonificación Sísmica de Cali*. INGEOMINAS, Bogotá. 55 p.

Dimaté, C., Pérez, J., Ojeda, A., Arcila, M., 2005. Elementos Sismológicos para la Caracterización de la Actividad Cortical en el Occidente Colombiano. *Informe No.1.7. Proyecto Microzonificación Sísmica de Cali*. INGEOMINAS.

Dorbath, L., Cisternas, A, Dorbath C., 1990. Assessment of the size of large and great historical earthquakes in Perú, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **80**, 3, 551 – 576.

INGEOMINAS, 2005. *Proyecto Mapa Geológico de Colombia*.

Kramer, Steven L., 1996. Geotechnical Earthquake Engineering, University of Washington. 653p.



- López, M. y Moreno-Sánchez, M. 2005, Tectónica y sedimentación en el piedemonte occidental de la Cordillera Central de Colombia. Un ejemplo en la cantera el Vínculo. *Memorias X Congreso Colombiano de Geología*. Bogotá.
- López, M., Audemard, F. y Velásquez, A. 2004, Compresión Holocena en el Valle del Cauca, Colombia. *Memorias II Congreso Colombiano de Sismología*. Armenia.
- Montes, N., Sandoval, A., 2001. Base de datos de fallas activas de Colombia. Recopilación bibliográfica. *Informe interno*. INGEOMINAS. Bogotá.
- Page, W., 1986. Geología sísmica y sismicidad al Noroeste de Colombia. Informe preparado para ISA. 156 p. Medellín.
- Paris, G., Machette, M., Dart, R., Haller, K., 2000. Map and database of Quaternary faults and folds in Colombia and its offshore regions, *USGS Open File Report 00-0284*.
- París, G., Marín, W., Romero, J., Wagner, J. J., 1989. Actividad Neotectónica en el Suroccidente de Colombia. *Memorias V Congreso Colombiano de Geología*, Bucaramanga.
- Paris, G., Romero, J., 1994. Fallas Activas en Colombia: INGEOMINAS, Santafé de Bogotá, *Bol. Geol.*, **34**, no. 2-3, p. 3-26.
- París, G., Sauret, B., 1991. Neotectónica. *En: Microzonificación Sismogeotécnica de Popayán, Publicaciones especiales del INGEOMINAS*, pp 28-49. Proyecto Colombo Europeo No. CCE NA 84/03. INGEOMINAS - BRGM - ADK - KS.
- Reiter, L., 1991. Earthquake Hazard Analysis, Columbia University.
- Romero et al., 2005. Investigaciones Neotectónicas en el Centro Occidente Colombiano. *Informe No.1.3. Proyecto Microzonificación Sísmica de Cali*. INGEOMINAS.
- Ruff, L., and Kanamori, H., 1980. Seismicity and the Subduction Process: Physics of the Earth and Planetary Interiors, v. 23, p. 240-252.
- Salcedo, E., Romero M.D., Vallejo, M.A. Cortés, M.A., 2005. Estudio de Sismicidad Histórica Regional. *Informe No.1.4. Proyecto Microzonificación Sísmica de Cali*. INGEOMINAS – Universidad del Valle.
- Sarria, Alberto, 1990. Ingeniería Sísmica. Editorial Uniandes, Bogotá.
- Schwartz, D., 1988. Geologic characterization of seismic sources: moving into the 1990s. Reprints from the Earthquake Engineering and Soil Dynamics II Proceedings GT Div/ASCE/June 1988.
- Stewart, J., Chiou, S., Bray, J., Graves, R., Somerville, P., Abrahamson, N., 2001. Ground Motion Evaluation Procedures for Performance-Based Design. PEER Report 2001/09 Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley.



Taboada, A., Rivera, L., Fuenzalida, A., Cisternas, A., Philip, H., Bijwaard, H., Olaya, J., Rivera, C., 2000. Geodynamics of the northern Andes: Subduction and intracontinental deformation (Colombia), *Tectonics*, **19**, 787-813.

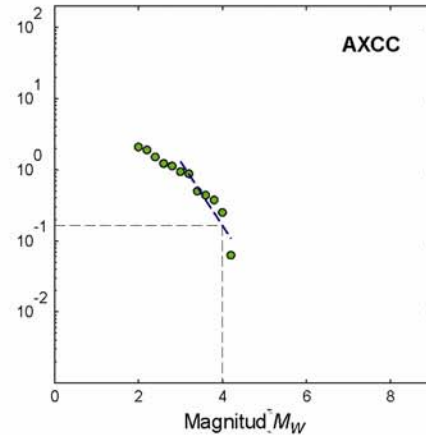
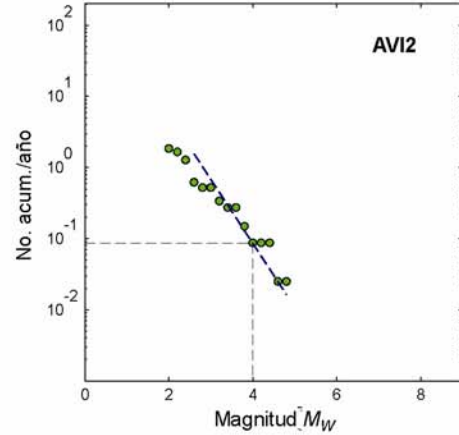
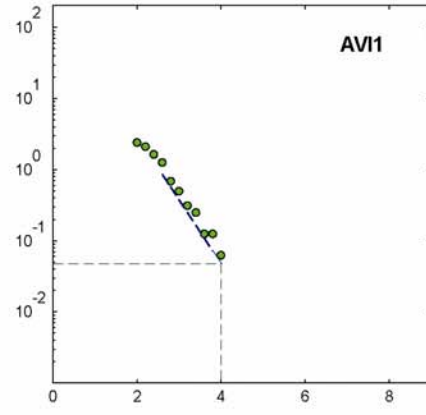
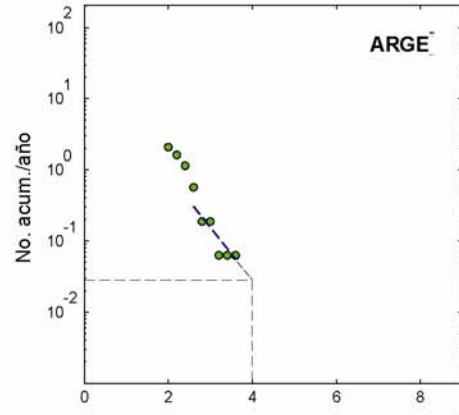
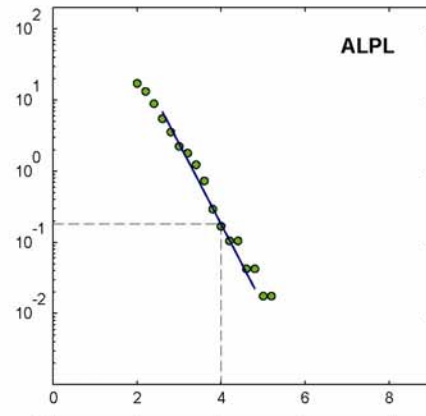
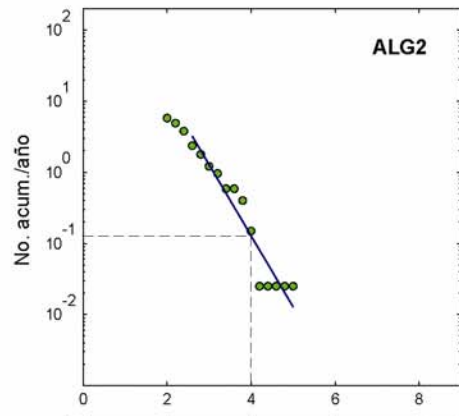
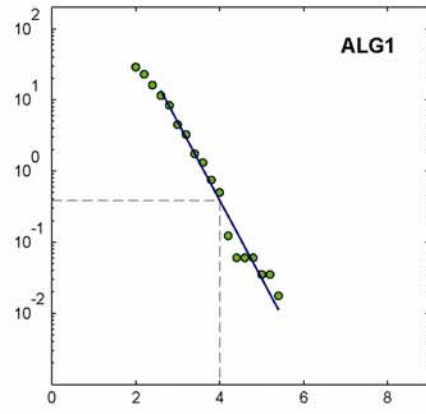
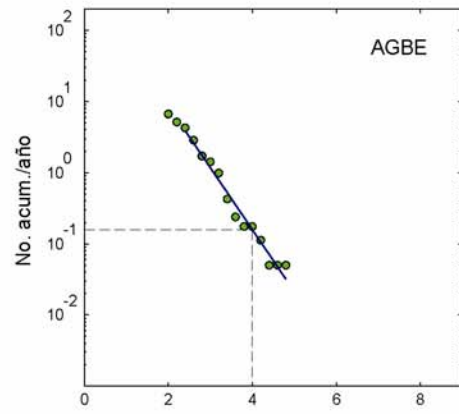
Wells, D., Coppersmith, K., 1994. New empirical relations among magnitude, rupture area and surface displacement, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **84**, 974-1002.

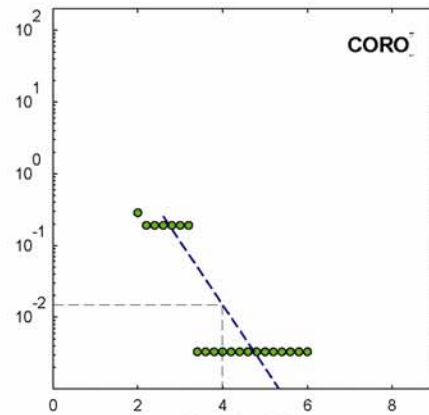
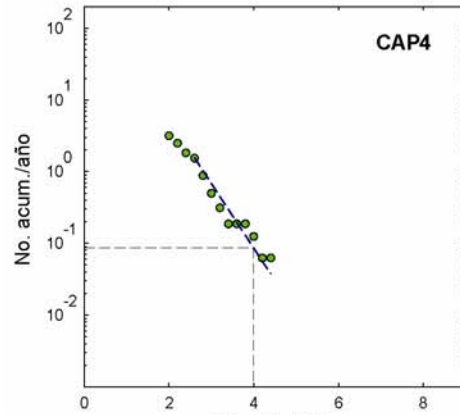
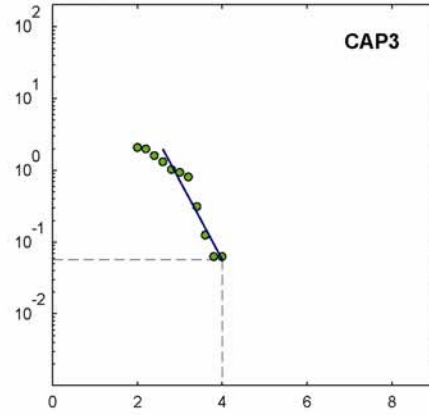
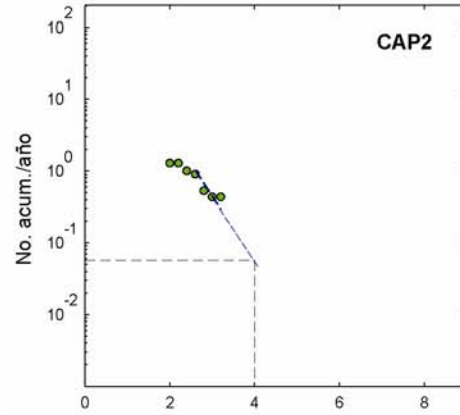
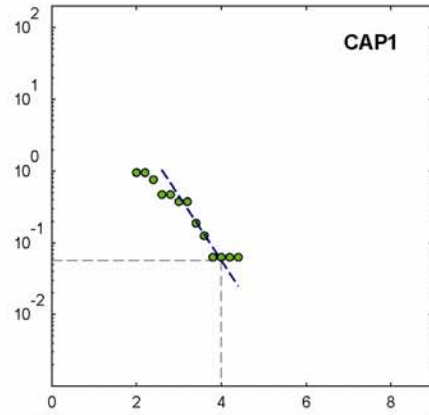
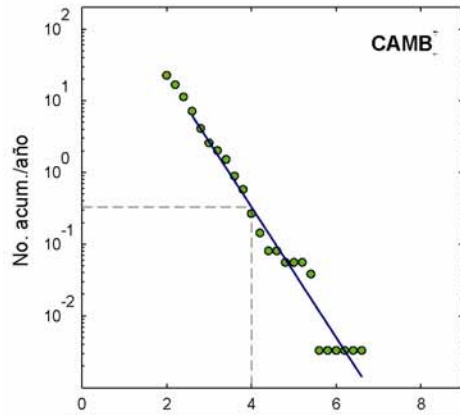
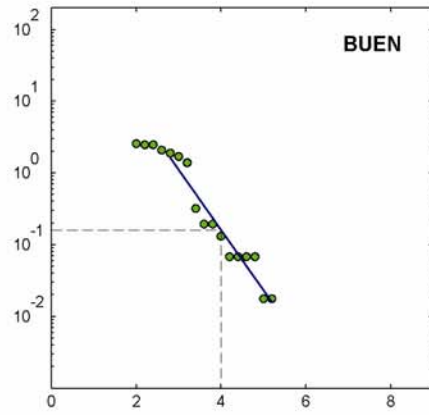
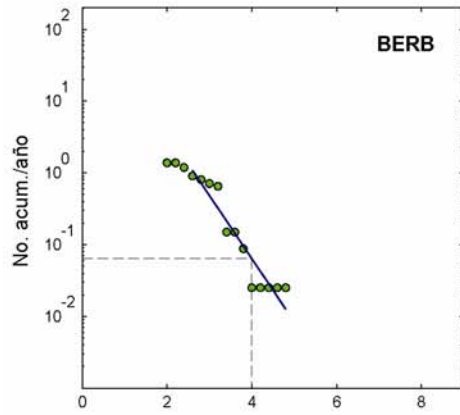
Woodward-Clyde Consultants, 1983, Seismic Hazard Evaluation Calima III Proyecto: Consorcio Integral-Planes, Ltda., Ingenieros Consultores 1a parte, Corporación Autónoma Regional del Cauca (CVC), Cali, Colombia, 116 p.

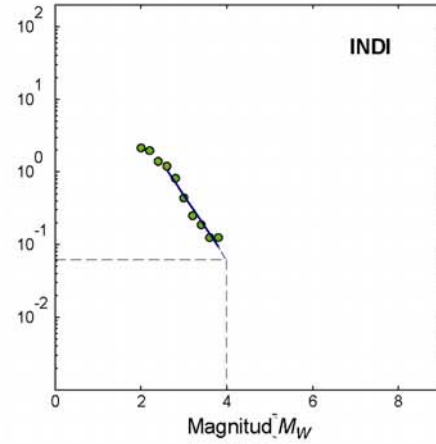
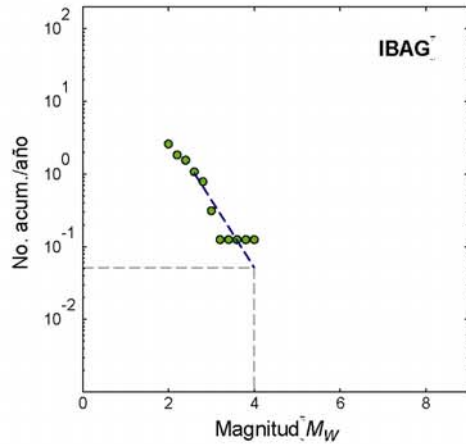
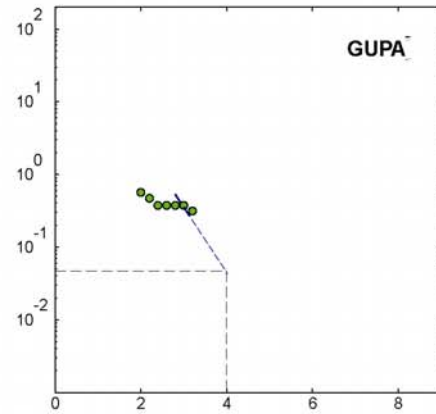
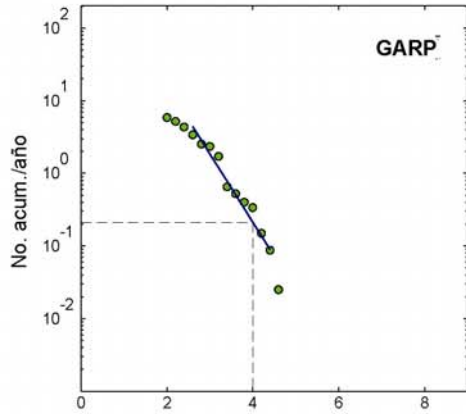
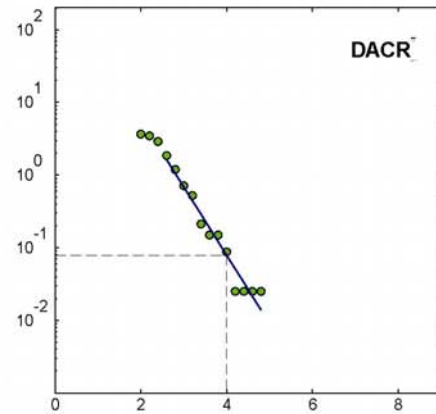
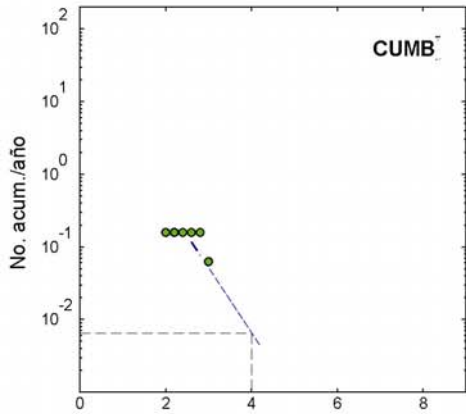
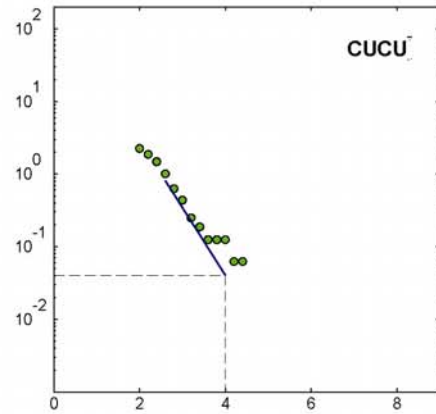
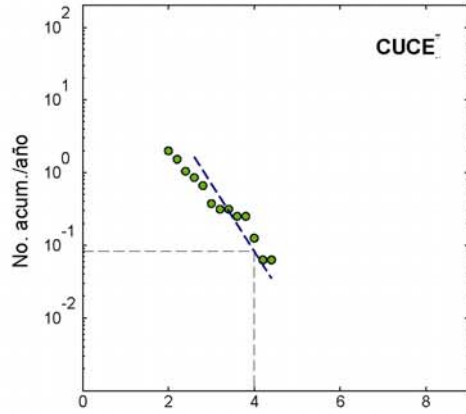


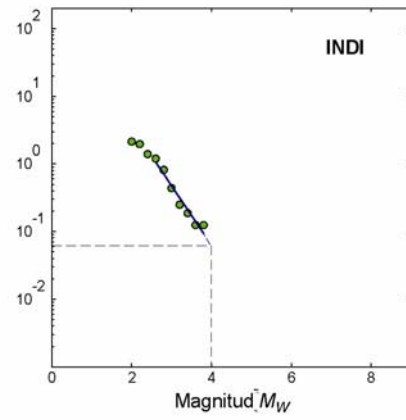
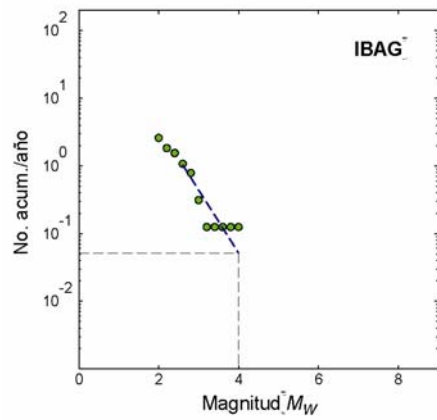
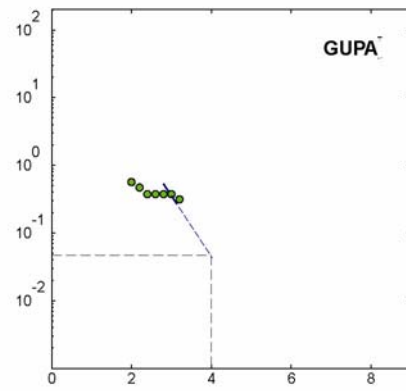
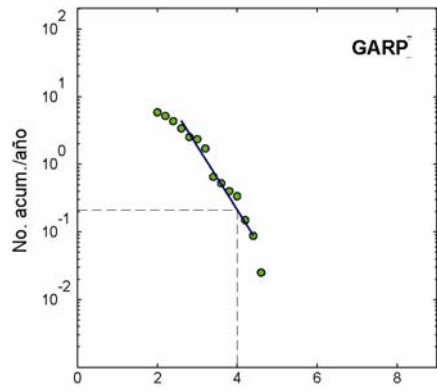
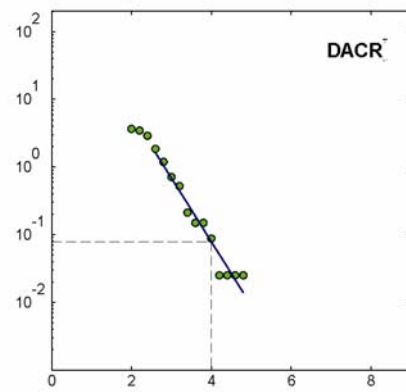
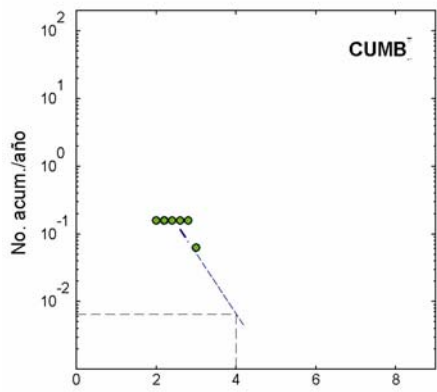
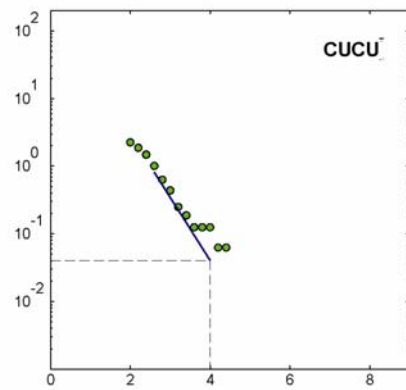
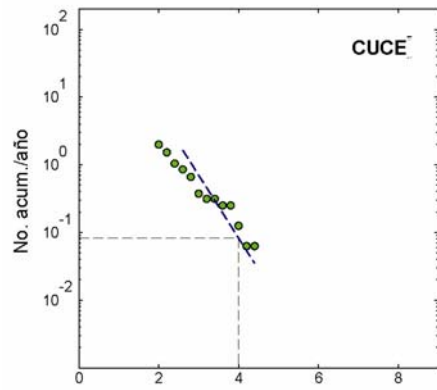
ANEXO 1

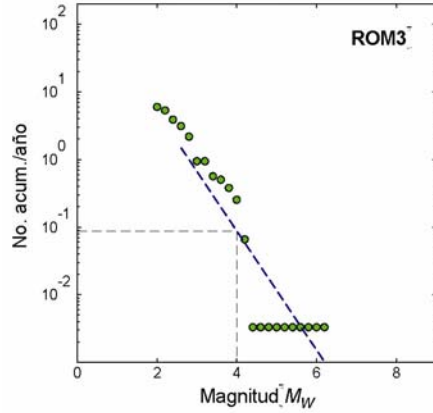
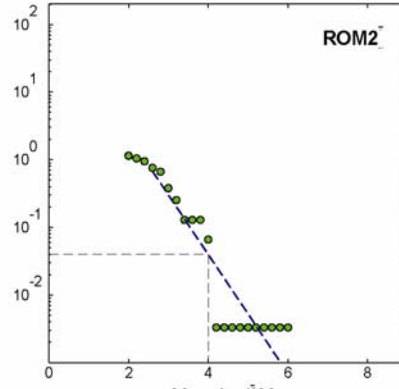
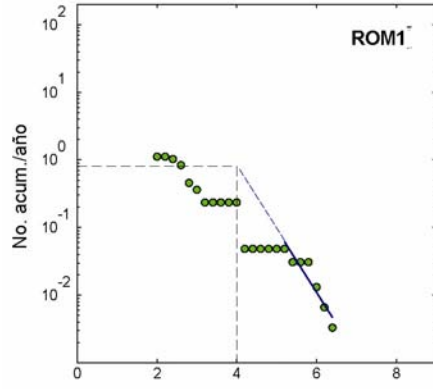
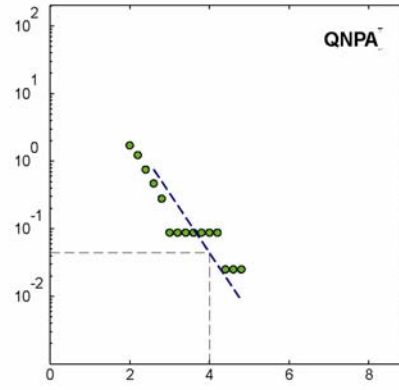
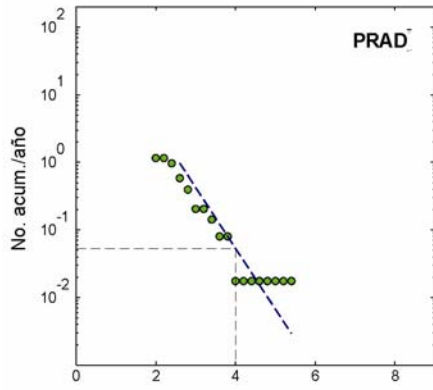
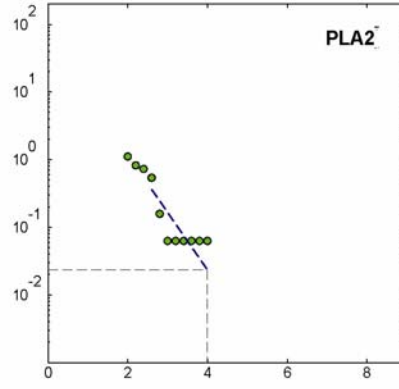
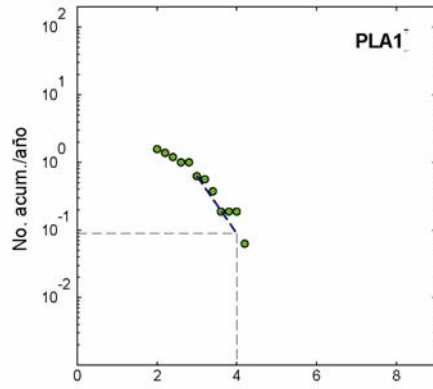
MODELOS Y PARÁMETROS DE TASA SÍSMICA A PARTIR DE DATOS SISMOLÓGICOS



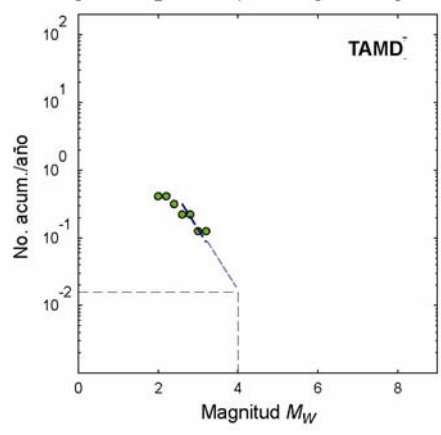
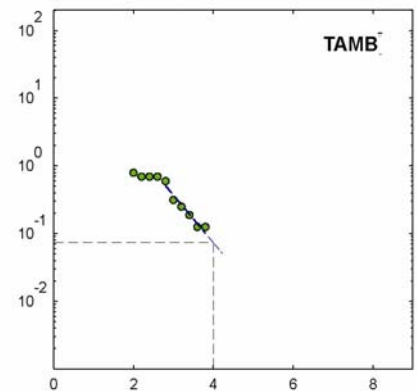
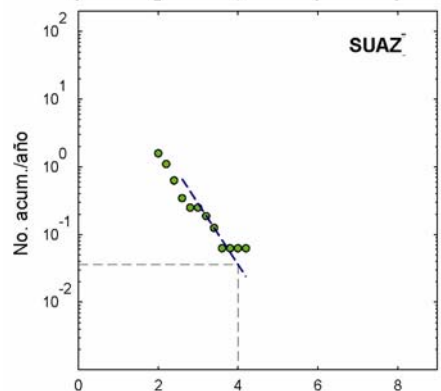
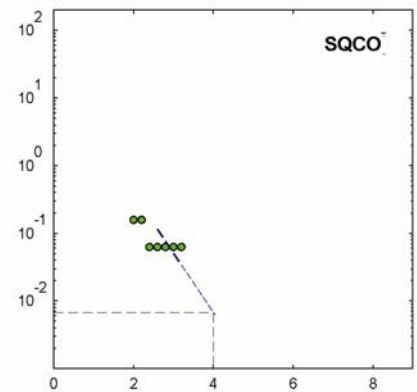
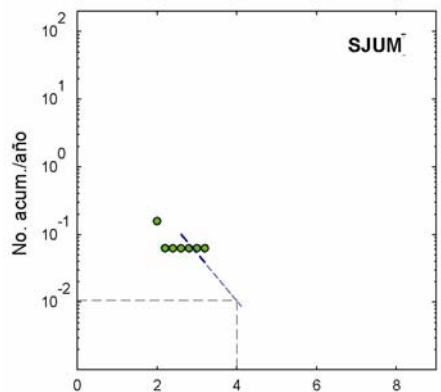
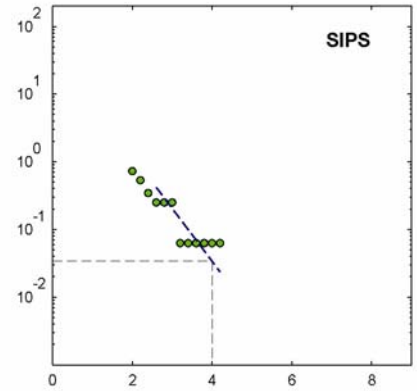
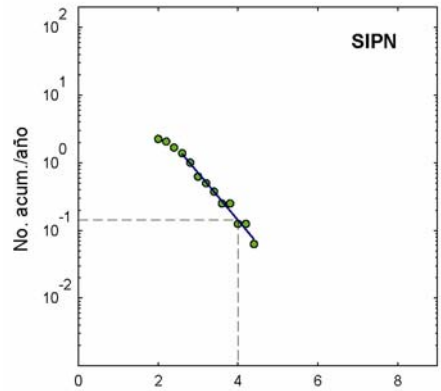








Magnitud M_W



Magnitud M_W

