
ANEXO F
AMENAZA POR DETONANTE SISMO

1. CONDICIONES DE AMENAZA SÍSMICA

Desde el punto de vista ingenieril, las laderas y taludes se encuentran en estados que van desde muy estables a marginalmente estables. Cuando un sismo ocurre induce un movimiento del terreno, a menudo, suficiente para causar fallas a taludes que están marginalmente a medianamente estables antes del sismo. Los daños resultantes pueden ser desde insignificantes a catastróficos, dependiendo de la geometría y de las características del material que las conforman. Los movimientos en masa inducidos por sismos han sido documentados. En el sismo de Alaska de 1964, se estima que el 56% de los costos totales de los daños fueron causados por deslizamientos inducidos (Youd, 1978, Wilson and Keefer, 1985). Kobayashi, 1981, encontró que más de la mitad de todos los muertos en terremotos en Japón (magnitud mayor a 6.9) entre 1964 y 1980 fueron causados por movimientos en masa.

Para evaluaciones preliminares de estabilidad, el conocimiento de las condiciones sobre las cuales los movimientos en masa han ocurrido en sismos pasados es muy útil. Es lógico esperar que el grado de actividad pudiera incrementarse con el incremento de la magnitud del sismo y que hubiera una magnitud mínima por debajo de la cual movimientos en masa inducidos por sismos podrían raramente ocurrir. Es igualmente lógico esperar que el grado de actividad pudiera disminuir con la distancia fuente a sitio y que hubiera una distancia más allá de la cual, los movimientos en masa podrían no ser esperados por sismos de cierto tamaño.

Un estudio de 300 sismos americanos entre 1958 y 1977 mostró que los sismos más pequeños que produjeron movimientos tuvieron una magnitud local alrededor de 4.0 (Keefer, 1984). La máxima distancia, fuente al sitio, a la cual los movimientos han sido inducidos en sismos históricos, son diferentes, de acuerdo al tipo de movimiento generado. Movimientos en masa y caídas, por ejemplo, han sido raramente encontrados más allá de distancias epicentrales de alrededor de 15 km para sismos de $M=5$, pero han sido observados hasta alrededor de 200 km para sismos de $M=7$. Similarmente, el área afectada también podría incrementarse con el incremento de la magnitud del sismo. Diferencias regionales en el comportamiento de la atenuación tienen una pequeña y aparente influencia sobre el área de los movimientos en masa inducidos por sismos.

Es evidente que la evaluación de estabilidad sísmica de las laderas es uno de los más importantes aspectos de la ingeniería sismogeotécnica. Para zonificación regional, como es nuestro caso, se puede considerar suficiente la información del estudio “Actualización del Mapa Nacional de Amenaza Sísmica (INGEOMINAS - Universidad Nacional, 2008-2010, informe en elaboración). Dicho estudio proporciona los valores de aceleración máxima horizontal a nivel de terreno firme (PGA) correspondiente a un periodo de 475 años, calculadas para una grilla cada 0.1 grados cubriendo la totalidad del territorio nacional y conformada por 16872 puntos, incluyendo adicionalmente 1114 puntos correspondientes a los municipios y capitales en origen Magna Sirgas Bogotá. En el marco del mencionado estudio, se ha empleado el método probabilístico con base en investigaciones geológicas, neotectónicas, sismológicas y de ingeniería sísmica. Los cálculos se han realizado mediante el uso del programa de computador Crisis (Ordaz *et al*, 2007), el cual tiene en cuenta los aspectos de geometría, recurrencia y ley de atenuación, así como los parámetros de probabilidad de excedencia y tiempo de exposición, definidos según la Normatividad Sismo resistente vigente (NSR-10). 7.3.2.1.

1.1 COBERTURA DEL DETONANTE SISMO

Por lo anterior y con base en los procesos y evidencias de inestabilidad que se han documentado en estudios de sismicidad histórica, así como en sismos recientes ocurridos en el territorio colombiano (p.e. Sismo de Páez en 1994, Sismo del Quindío en 1999, Sismo de Quetame en 2008, entre otros), la cobertura del detonante sismo obedece a la hipótesis de que a mayor aceleración sísmica horizontal basal (a nivel de roca), se incrementarán las fuerzas actuantes y se reducirán las fuerzas resistentes debido al incremento de las presiones de poros, lo cual no solamente depende del entorno sismo tectónico considerado, sino de otras condiciones como la topografía del terreno y la disposición, espesor y propiedades dinámicas de los materiales que conforman el subsuelo, aspectos locales que están fuera del alcance del presente estudio. De esta manera, el cálculo del detonante sismo se generó a partir de los datos de PGA (cm/seg^2) correspondientes a un periodo de retorno de 475 años, los cuales fueron rasterizados y categorizados cada 50 gales, permitiendo de esta forma calificar, de forma cualitativa (Tabla 1). Para el área de estudio, se debe tener en cuenta para el criterio de calificación la Tabla 2, el grado de contribución del sismo a la ocurrencia de movimientos en masa. En la Figura 1 se presenta la cobertura calificada del detonante sismo a nivel nacional, observándose que las zonas de mayor contribución coinciden con la localización de las estructuras geológicas y fuentes sismogénicas de mayor actividad y recurrencia sísmica, como es el caso del occidente colombiano, la zona centro-oriental andina y la Cordillera Oriental.

Tabla 1. Calificación del detonante sismo según su contribución a los movimientos en masa. (Tomado de SGC, 2012).

Valores de PGA (cm/seg ²)	Calificación
10-100	1
100-150	2
150-200	3
200-300	4
>300	5

Tabla 2. Calificación de los valores de PGA de menor a mayor grado de contribución de la amenaza sísmica a su contribución a los movimientos en masa. (Fuente: INGEOMINAS, 2009)

Valores de PGA (cm/seg ²)	Calificación
<100	1
100-150	2
150-200	3
200-300	4
>300	5

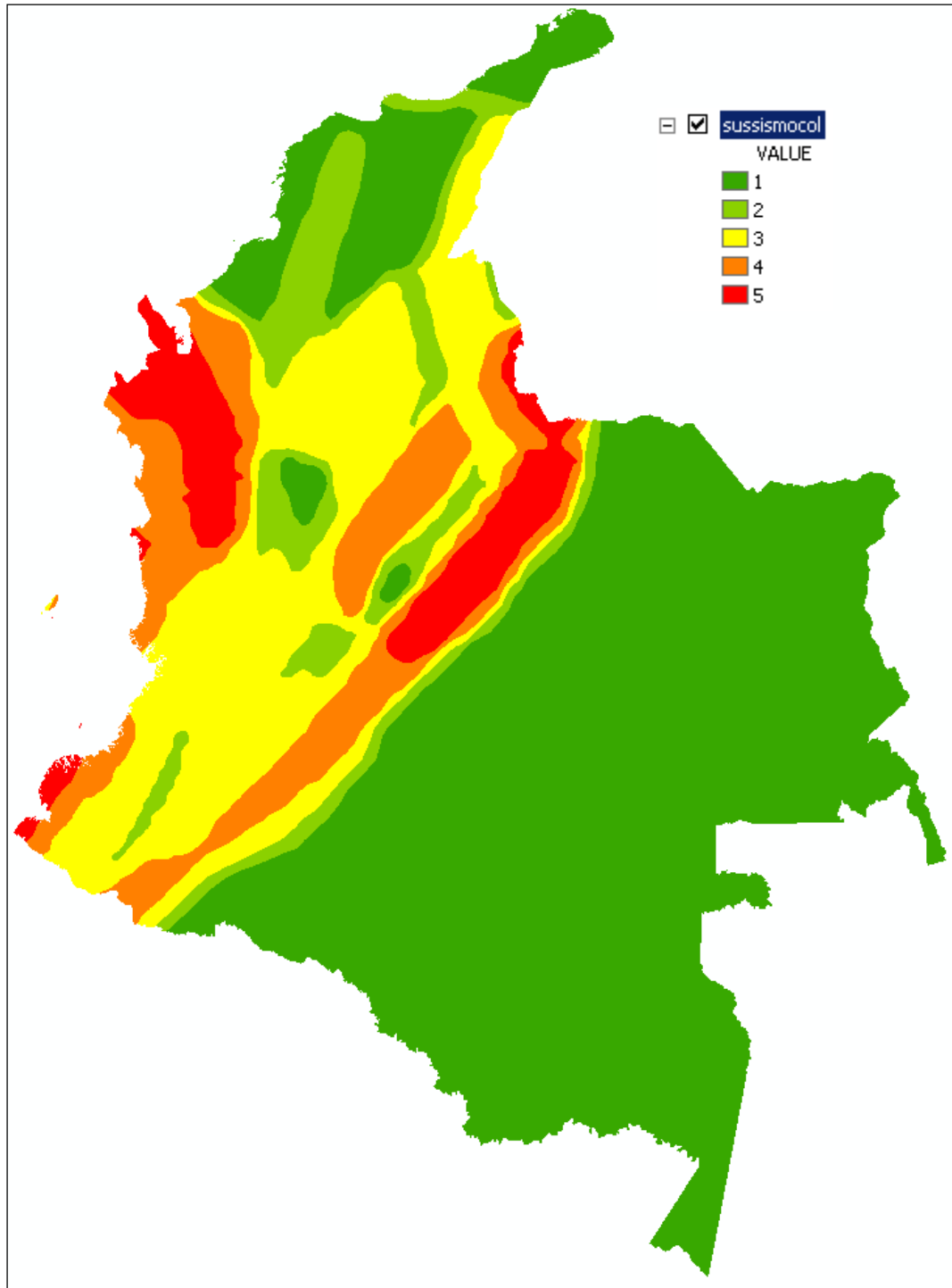


Figura 1. Aceleración máxima horizontal a nivel de roca-PGA calificada con base en su contribución a la generación de movimientos en masa (valores de PGA tomados de: Actualización del Mapa Nacional de Amenaza Sísmica, INGEOMINAS & Universidad Nacional, 2008-2010).

1.2 SÍNTESIS DEL MAPA DE AMENAZA A PARTIR DE LA VARIABLE DEL DETONANTE SISMO

Las condiciones sísmicas presentes en la región de la plancha 133 se analizan a partir del componente del detonante sismo (Suministrado por SGC), en el cual se pueden obtener aspectos del comportamiento del terreno al someterse a factores que producen inestabilidad sobre las laderas y de esta forma generar planos de movimiento en sus diferentes mecanismos. El presente análisis se enfoca en la influencia que tiene el detonante Sismo sobre el área de estudio, por lo tanto se evalúan las condiciones del terreno para generar diferentes rangos de amenaza que sectorizan la plancha en zonas de bajo a muy alto grado de estabilidad.

El territorio Colombiano se ubica en la interacción de tres placas tectónicas (Nazca, Caribe y Sudamericana), las dos primeras generan márgenes convergentes en la zona oeste del territorio Colombiano sobre las costas Pacífica y Atlántica, estos márgenes destructivos producto del choque contra el cratón Sudamericano generan un grado de inestabilidad en las regiones adyacentes a estos márgenes, lo cual se refleja en un alto grado de actividad sísmica debido al movimiento y ruptura del cratón.

Dentro de este contexto geodinámico se generan diversas estructuras regionales que dividen el territorio Colombiano en diferentes bloques tectónicos contenidos en el sistema Orogénico Andino; estos bloques se encuentran limitados por fallas de carácter regional como el sistema de Fallas de Borde Llanero, el sistema de Fallas de Romeral, la Falla de Bucaramanga-Santa Marta y la Falla de Oca. El comportamiento de estas estructuras genera el registro sísmico el cual se muestra en el mapa de actividad sísmológica para Colombia (Figura 2).

La calificación de amenaza por el detonante sísmico obedece a un estudio de esta actividad y genera el mapa de amenaza por actividad sísmica, el cual es suministrado por el Servicio Geológico Colombiano.

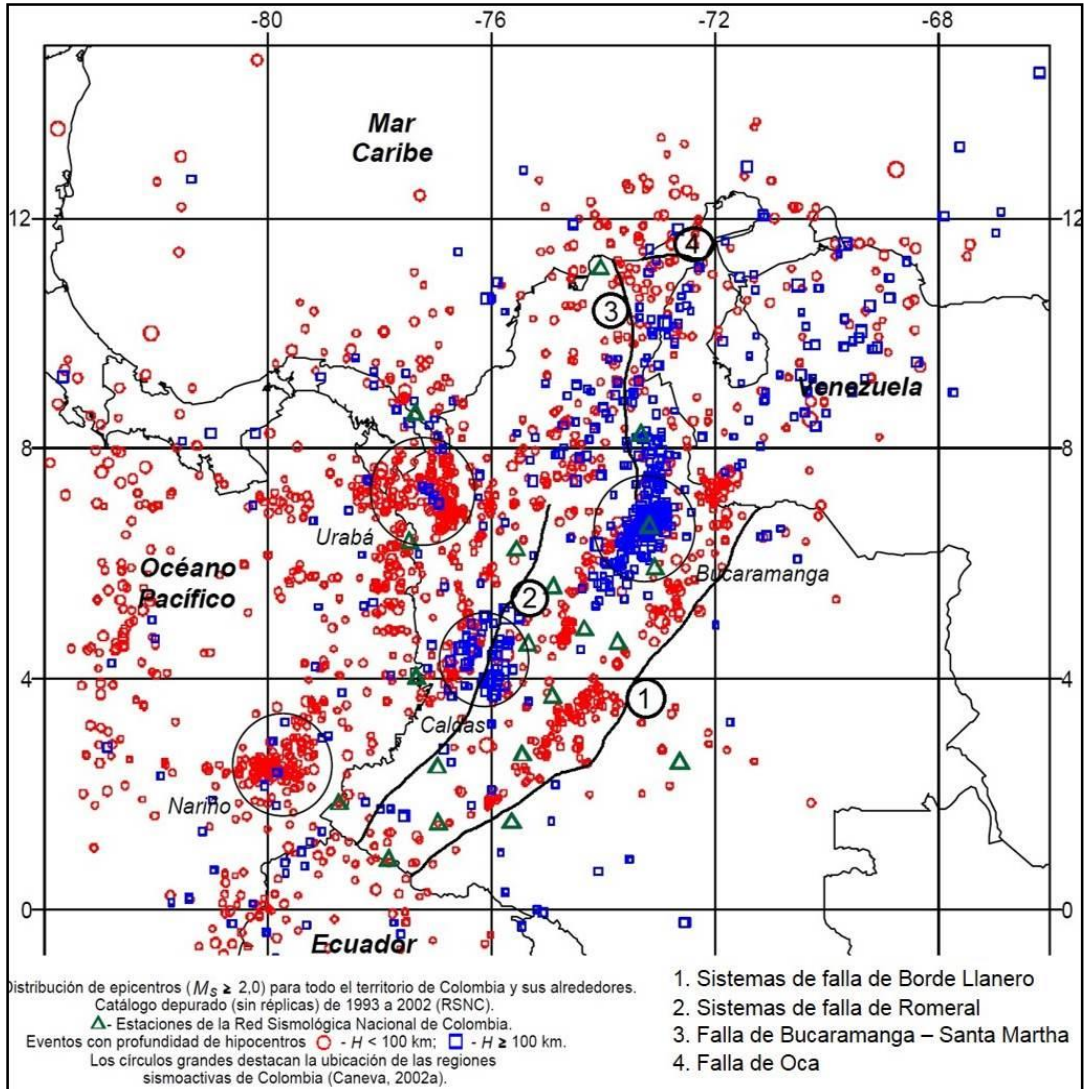


Figura 2. Distribución de epicentros, estaciones de la RSNC y estructuras principales de carácter regional (Tomado y modificado de Rincón *et al*, 2004).

El cubrimiento para la Plancha 133 Puerto Berrío, por medio del mapa sísmico, es completo (Figura 3). La actividad consignada allí, a partir del año 1900 a la actualidad, registra, para el sector occidental (flanco oriental de la Cordillera central), una gran cantidad de eventos sísmicos de magnitudes de 0 hasta 4 Mw; mientras tanto, al oriente del río Magdalena (Departamento de Santander), los eventos son de menor magnitud y ocurrencia. En general, esta condición sísmica puede establecer, en mediano y alto grado, planos donde las superficies presenten inestabilidad en las laderas y por consiguiente movimientos sobre las mismas, incluyendo algunos otros factores como por ejemplo el tipo de roca, la cobertura vegetal y las condiciones del suelo.

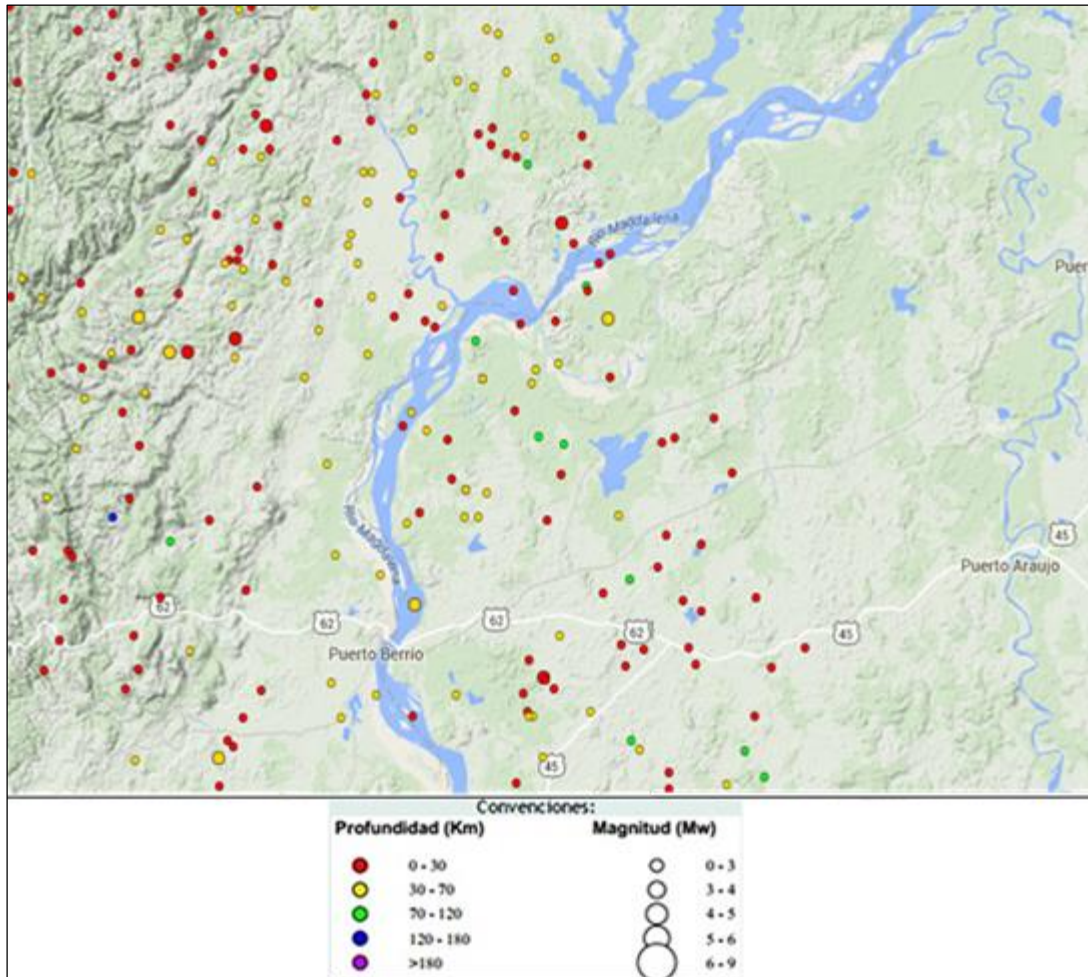


Figura 3. Mapa de puntos sísmicos registrados para la región de la plancha 133, tomado de Red Sismológica Nacional.

En un análisis más puntual de la región, donde refleja los parámetros del detonante sismo, se observan solo dos valores de calificación, Medio y Alto.

La calificación alta del detonante sismo abarca el 6% (144 km²), se localiza en el límite sureste de la plancha en la vereda El Águila del Municipio de Cimitarra Departamento de Santander, dónde se presentan valores de PGA con velocidades de desplazamiento horizontal de 200 a 300 cm/seg². Esta categoría no registra movimientos en masa.

La calificación Media del detonante sismo abarca el 94% (2256 km²) del área total y está ubicada en todos los municipios que conforman la plancha 133, en el Departamento de Antioquia se presenta en los municipios de Remedios, Yalí, Maceo, Yolombó, Yondó y Puerto Berrío; en el Departamento de Santander se presenta en los municipios de Cimitarra y Puerto Parra. Se presentan las zonas

con rango medio a la actividad sísmica, cuyos valores de PGA se expresan con velocidades de desplazamiento horizontal de 150 a 200 cm/seg². Representando zonas medianamente propensas a la desestabilidad de las laderas, debido al detonante sismo, principalmente en el sector de la cordillera donde se observa una alta densidad de fracturamiento en las rocas afectadas por las principales fallas de la región como la falla Palestina. En esta zona se presentan la mayoría de los movimientos en masa de tipo deslizamiento, caída de rocas y detritos, y reptación en el suroeste de la plancha en la vereda Brasil en la vía principal hacia el oeste del Municipio de Puerto Berrío. (Figura 4).

Ya incluyendo el detonante sismo a la calificación por susceptibilidad total de la plancha, la cual agrupa variables como la Geología, Geomorfología, Suelos y Coberturas, se genera un nuevo mapa de amenaza por detonante sismo. La calificación media se registra en casi toda la plancha, excepto en la esquina suroriental, al centro-occidente y pequeñas zonas aisladas al norte y occidente, que presenta calificación alta (Figura 5).

1.2.1 Amenaza Baja

Las zonas que presentan rangos de amenaza Baja corresponden a aquellas regiones que son menos vulnerables a los efectos del detonante sismo; se distribuye en escasa cantidad y heterogéneamente sobre el cauce del río Magdalena, en la región central (límites de los departamentos de Antioquia y Santander). Caracterizada por presentar, en su totalidad, unidades geomorfológicas del ambiente Fluvial – Lagunar (donde predominan las geoformas Cauce Activo y Laguna), estas se encuentran desarrolladas en áreas con relieves bajos, topografía suave y pendientes planas a suavemente inclinadas. Sobre estas regiones no se registran procesos morfodinámicos (ni movimientos en masa ni procesos erosivos).

1.2.2 Amenaza Media

La categoría Media corresponde a la clasificación más representativa del área de interés y abarca zonas con un medio grado a la desestabilidad del terreno por efecto sísmico. Las geoformas representativas de este rango de calificación pertenecen al ambiente Denudacional (en su mayoría) y algunas unidades geomorfológicas del ambiente Fluvial – Lagunar; desarrolladas en suelos cubiertos por pastos limpios, en climas cálidos y húmedos. Exhibe valores de PGA, expresados en velocidades de desplazamiento horizontal desde 150 cm/seg² hasta 200 cm/seg². Bajo estas características, fueron cartografiados cinco procesos morfodinámicos (movimientos en masa), correspondientes a cuatro deslizamiento y una caída de material.

1.2.3 Amenaza Alta

El rango más alto por amenaza sísmica de la plancha, se localiza principalmente en la zona centro-occidental de la misma, así como en el sector suroriental, pero, en menor proporción. Geoformas como colinas y lomos, altamente disectados, escarpes (de tipo erosivos y de falla), conos y lóbulos coluviales de soliflucción, corresponden a las unidades más representativas. Presenta un amplio rango de valores de PGA, expresados en velocidades de desplazamiento horizontal desde 150 cm/seg² hasta 300 cm/seg², incrementando así, la desestabilidad de los taludes o de las laderas. Exhibe coberturas de tipo pastos limpios y bosques que presentan algún tipo de intervención, desarrollados en climas cálidos y húmedos. No se registran procesos morfodinámicos (ni movimientos en masa ni procesos erosivos).

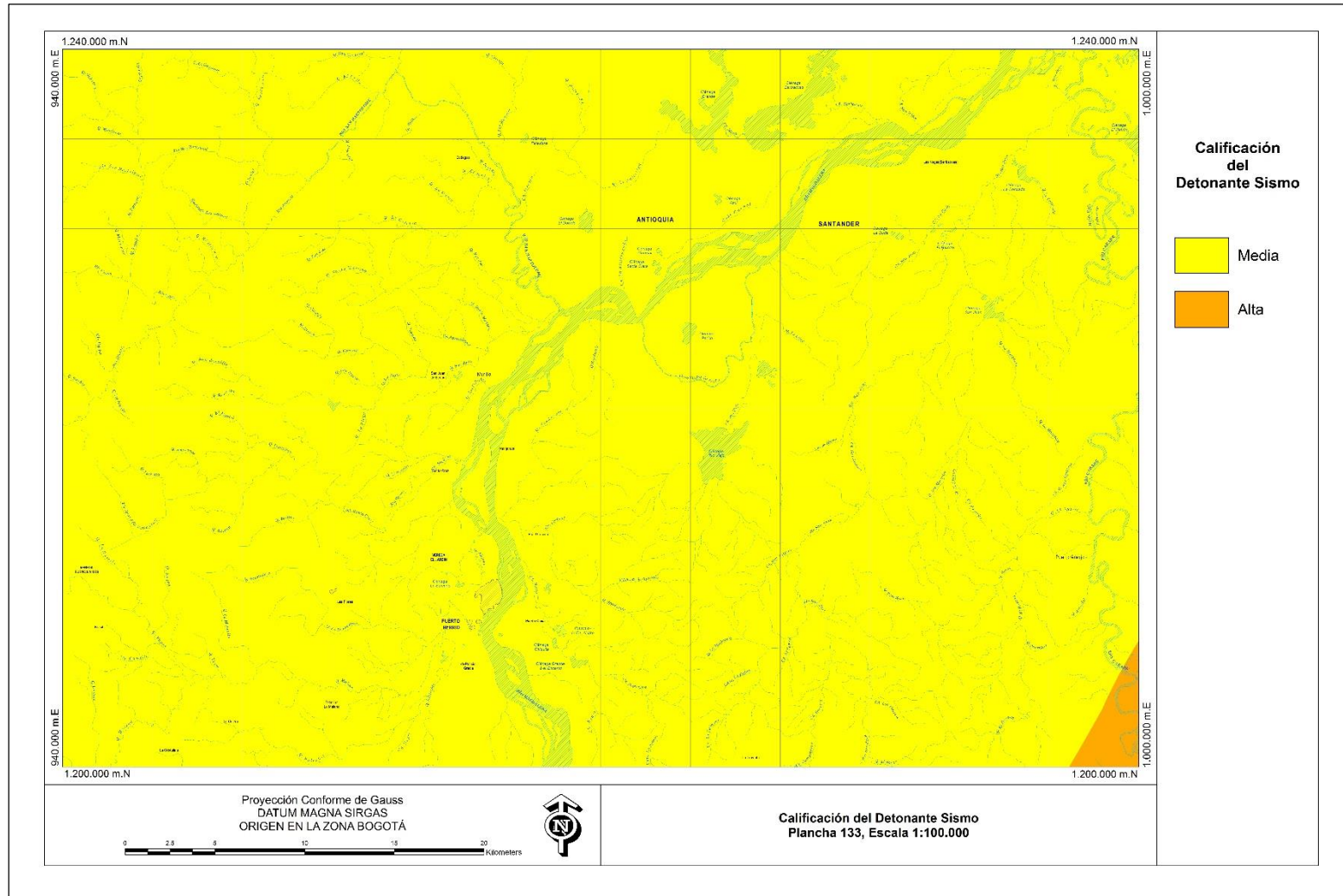


Figura 4. Mapa del Detonante Sismo suministrado por el SGC.

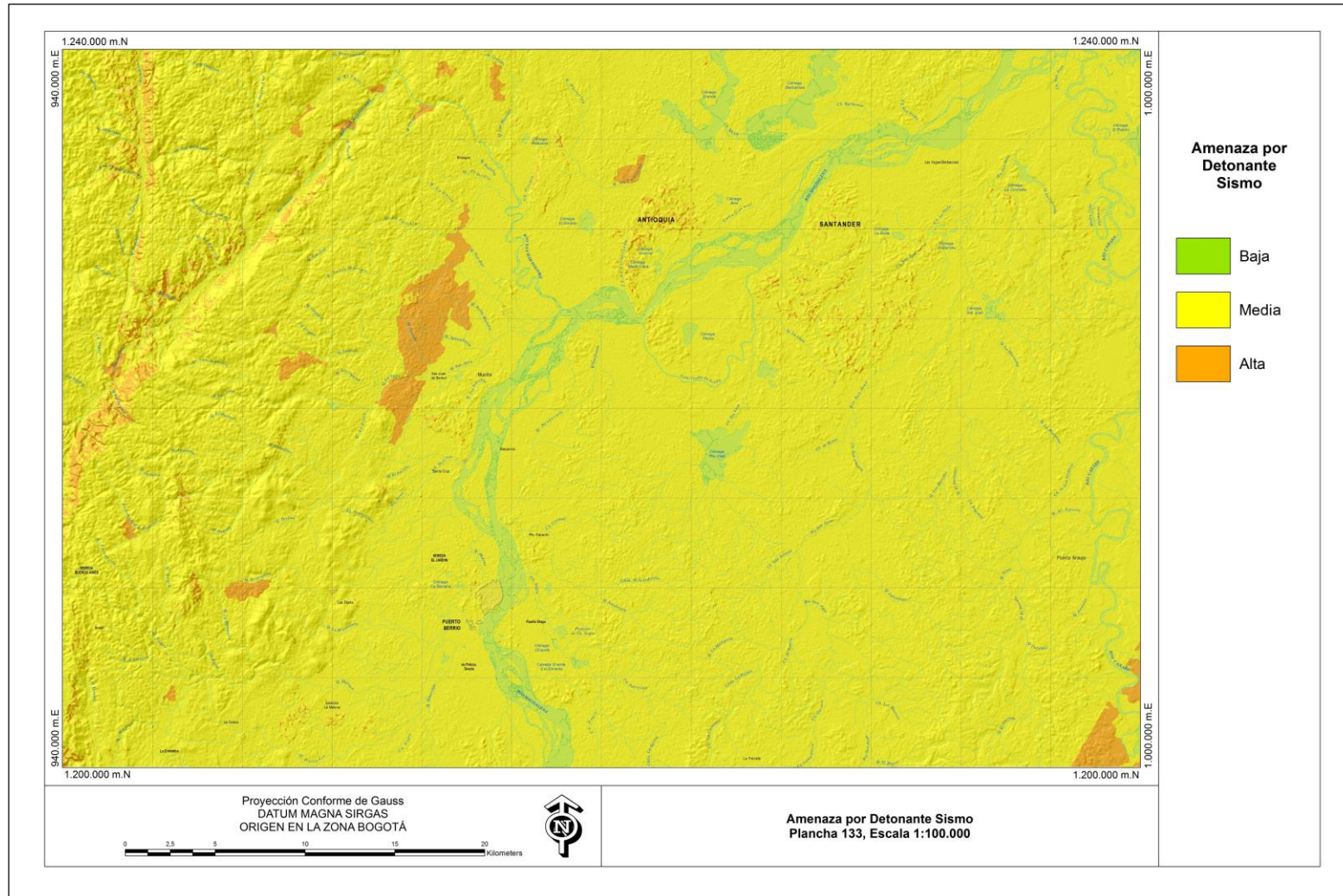


Figura 5. Mapa del resultado del cálculo entre la Susceptibilidad total y el Detonante sismo.