SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO

MAPA DE INTENSIDADES MÁXIMAS OBSERVADAS PARA COLOMBIA

Bogotá, febrero de 2015

MINMINAS

TODOS POR UN NUEVO PAÍS
PAZ EQUIDAD EDUCACIÓN

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO

Dirección de Geoamenazas

MAPA DE INTENSIDADES MÁXIMAS OBSERVADAS PARA COLOMBIA

Por:

Ana Milena Sarabia Gómez

Geógrafa

Bogotá, febrero de 2015

CONTENIDO

Pág.

RESUMEN 7

ABSTRACT 8

INTRODUCCIÓN 9

1. ANTECEDENTES 10

2. METODOLOGÍA 20

3. RESULTADOS 24

3.1 COMPARACIÓN CON MAPA POTENCIAL DE DAÑO 33

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 38

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Mapa de intensidad máxima con período de retorno de 100 años 11
Figura 2. Mapa de intensidades máximas observadas del Perú. 13
Figura 3. Mapas de intensidad máxima observada para Japón (Escala JMA) 15
Figura 4. Mapa de intensidades máximas observadas de Malasia 16
Figura 5. Mapas de intensidades máximas observadas para Ecuador 18
Figura 6. Mapa de intensidades máximas observadas de Argelia 19
Figura 7. Puntos de intensidad máxima por localidad. 21
Figura 8. Histograma puntos de intensidad - Superposición 22
Figura 9. Histograma puntos de intensidad – Intensidad equivalente 23
Figura 10. Intensidad 4 24
Figura 11. Intensidad 5 24
Figura 12. Intensidad 6 24
Figura 13. Intensidad 6/7 24
Figura 14. Intensidad 7 24
Figura 15. Intensidad 7/8 24
Figura 16. Intensidad 8 25
Figura 17. Intensidad 9 25
Figura 18. Intensidad 10 25
Figura 19. Intensidad máxima observada – Superposición de intensidades 26
Figura 20. Intensidad máxima observada y puntos de intensidad 28
Figura 21. Errores de interpolación – Superposición de intensidades 29
Figura 22. Intensidad máxima observada – Intensidad equivalente. 31
Figura 23. Errores de interpolación – Intensidad equivalente 32
Figura 24. Mapa de percepción del movimiento y potencial de daño 34
Figura 25. Mapa de diferencias de intensidades observadas y potencial de daño. 36
Figura 26. Histograma diferencia de valores PGA (%g). 37

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Versión abreviada de la escala EMS-98 27
Tabla 2. Comparación intensidad máxima – intensidad equivalente 30
Tabla 3. Relación intensidad – PGA (Wald *et al.*, 1999) 34

LISTA DE ANEXOS

Pág.

Anexo A. Mapa de intensidades máximas observadas para Colombia

RESUMEN

En este informe se presenta el mapa de intensidades máximas que se han observado en Colombia entre los años 1644 y 2013. Para elaborar este mapa se realizó la interpolación de las intensidades utilizando dos metodologías, la primera, es la superposición de intensidades la cual utiliza las intensidades máximas estimadas en cada sitio del que se tenga información. La segunda, es el método de intensidad equivalente, el cual utiliza todas las intensidades que se han registrado en cada sitio para convertirlos a magnitud y posteriormente a energía máxima liberada.

Finalmente, el mapa obtenido se compara con el mapa de potencial de daño, en el cual se calculó el valor de PGA teniendo en cuenta el mapa de amenaza sísmica de Colombia con un período de retorno de 475 años y las condiciones de sitio.

ABSTRACT

I present the maximum observed intensity map of Colombia from 1644 to 2013. I used two methodologies, the first one, was interpolating the maximum intensity for each site. The second one, was called the “equivalent intensity”, which uses all the intensities recorded by site in order to turn them into magnitude and subsequently to maximum released energy.

Finally, I compared the maximum observed intensity map with a damage potential map, which was made using the hazard seismic map of Colombia for 475 years return period and site conditions.

INTRODUCCIÓN

El mapa de intensidades máximas para Colombia permite ver de una manera sencilla y general los efectos que a causa de los sismos se han experimentado históricamente en diferentes regiones del país.

Este mapa se elaboró utilizando como información de entrada la consignada en el Sistema de información de sismicidad histórica de Colombia, disponible en línea: http://agata.sgc.gov.co:9090/SismicidadHistorica/, donde se encuentran almacenadas las referencias históricas, evaluación macrosísmica y parámetros sismológicos de los eventos significativos que han ocurrido en Colombia desde el año 1644.

Dada la ventana de tiempo con la cual se elabora el mapa (1644-2013), este sirve como referencia de comparación con el mapa de amenaza sísmica con un período de retorno de 475 años.

El primer mapa en el cual se tuvieron en cuenta las intensidades máximas registradas históricamente en el país, fue elaborado en el año 1977 por Gabriel Estrada y Jesús Emilio Ramírez. Aunque no ha sido posible conseguir el mapa original y la memoria del mismo, este se incluyó en el Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia (AIS, 1996), del cual se toma la referencia.

Posteriormente, en el marco del Proyecto SISRA se elaboró el mapa de intensidades máximas en América del Sur, en el cual se compilaron mapas de isosistas de sismos históricos de todos los países participantes en el proyecto.

En este informe se presentan algunas metodologías que han sido utilizadas para generar mapas de intensidades máximas observadas en diferentes regiones y sus resultados; se explica la metodología que se aplicó para elaborar el nuevo mapa de intensidades máximas observadas para Colombia y se hace una interpretación. Finalmente, se realiza la comparación del mapa obtenido con el de percepción de movimiento sísmico y potencial de daño para un período de retorno de 475 años y probabilidad del 10% en 50 años.

1. ANTECEDENTES

A continuación se mencionan las principales características que han tenido en cuenta algunos estudios en los cuales se han elaborado mapas de intensidades máximas observadas.

- ESTRADA URIBE, G., RAMÍREZ, J. (1977). *Mapa de riesgo sísmico*. Instituto Geofísico Universidad Javeriana. *Citado en*: AIS, 1996.

No ha sido posible encontrar el mapa original y no se conoce la metodología utilizada para realizarlo. Únicamente se sabe que es un mapa en el que se presenta la intensidad máxima esperada en el territorio nacional con un período de retorno de 100 años y se utiliza la escala de intensidad de Mercalli Modificada (*Figura 1*).

En la *Figura 1* se observan isolíneas sobre el territorio colombiano, que dividen zonas de igual intensidad, entre $5^{1/2}$ y 8. Las áreas donde se espera ocurran menores intensidades (entre $5^{1/2}$ y $6^{1/2}$) en un siglo, son las regiones Caribe, Amazónica y Orinoquía.

Las zonas donde se espera que se presenten intensidades importantes (entre $7^{1/2}$ y 8) con un período de retorno de 100 años, son el Eje Cafetero, Cali, Ibagué, Medellín, Bogotá, el borde oriental de la Cordillera Oriental y los santanderes.

- CERESIS. (1985). *Mapa de intensidades máximas en América del Sur.* Serie SISRA. Volumen 12.

Se elaboraron mapas de intensidad máxima observada de los países de América del Sur, en el marco del Programa para la Mitigación de los Efectos de los Terremotos de la Región Andina (Proyecto SISRA), patrocinado por CERESIS.

El resultado del estudio es un informe en el cual se describen los datos utilizados por cada país para la elaboración del mapa, pero no se incluye la metodología empleada. De igual forma, se presenta un mapa general de isosistas máximas de América del Sur (escala 1:5.000.000), pero no se presenta el mapa elaborado por cada uno de los países.

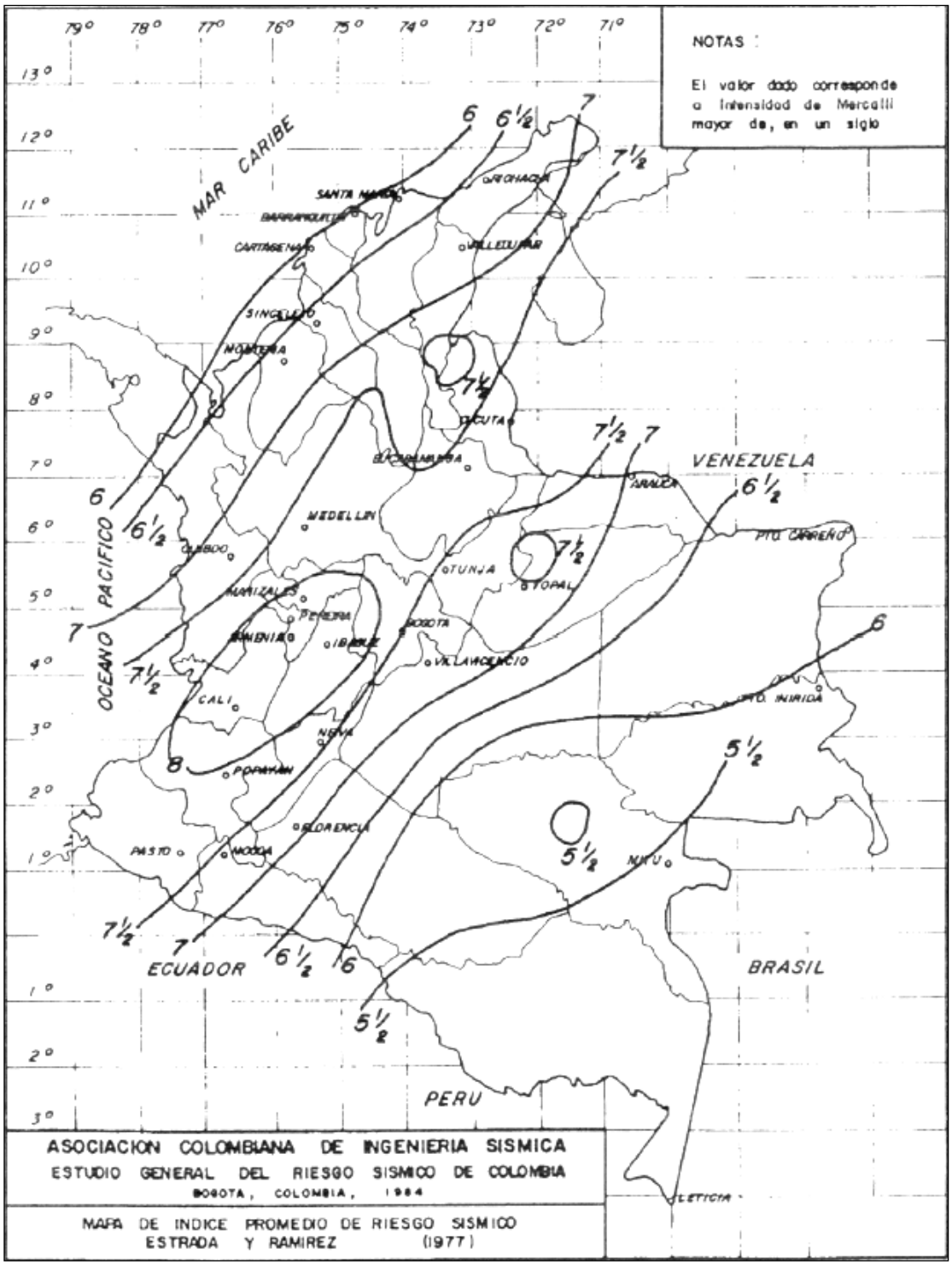

Figura 1. Mapa de intensidad máxima con período de retorno de 100 años
***Tomado de*:** AIS (1996)

Para el caso de Colombia, el informe fue elaborado por el ingeniero Alberto Sarria y se tuvieron en cuenta 152 sismos ocurridos en la zona Andina y el pacífico colombiano hasta el año 1982. Se descartaron sismos ocurridos en el Nido de Bucaramanga, por tener focos profundos e intensidades relativamente bajas.

Los datos de estos 152 sismos fueron tomados de diversas fuentes:
- "Historia de los terremotos en Colombia", obra de Jesús Emilio Ramírez.
- Formularios para la evaluación de intensidades
- Visitas a zonas afectadas por sismos
- Crónicas de archivos históricos
- Prensa y fotografías

En el análisis y posterior elaboración del mapa no se tuvieron en cuenta sismos importantes como el del 18 de octubre de 1743, 12 de julio de 1785, 17 de junio de 1826, 16 de noviembre de 1827, 20 de enero de 1834 y 31 de agosto de 1917, según el autor, por no tener clasificada la información.

Las intensidades máximas observadas se presentaron en Cúcuta (Intensidad 10), debido al sismo de 1875. En Tumaco y al suroccidente del Huila se alcanzaron intensidades 9 y la intensidad 7 se presentó en la parte central del país.

- ALVA HURTADO *et al.* (1984). *Distribución de máximas intensidades sísmicas observadas en el Perú*.

Este informe fue preparado en el marco del Proyecto SISRA y describe la elaboración del mapa de intensidades máximas observadas en el Perú (escala 1:5.000.000), para el cual se utilizaron 30 mapas de isosistas de sismos históricos y recientes, ocurridos entre 1619 y 1981, utilizando la escala de intensidad Mercalli Modificada.

La metodología para elaborar el mapa de intensidades máximas observadas fue haciendo uso de la superposición de los 30 mapas de isosistas (con intensidad mayor que 3), estandarizándolos a escala 1:2.000.000 y con base en esa información se trazaron las curvas de intensidades máximas. Los valores extremos de tipo local o que solamente contaban con un valor máximo de intensidad se representaron separadamente del mapa.

Según el autor el mapa resultante (*Figura* 2), es similar al de Zonificación sísmica del Perú que existía en el año 1977, ya que las zonas de sismicidad baja, coincidían con las de intensidad menor que 4 y las de sismicidad alta con las de intensidad mayor que 6.

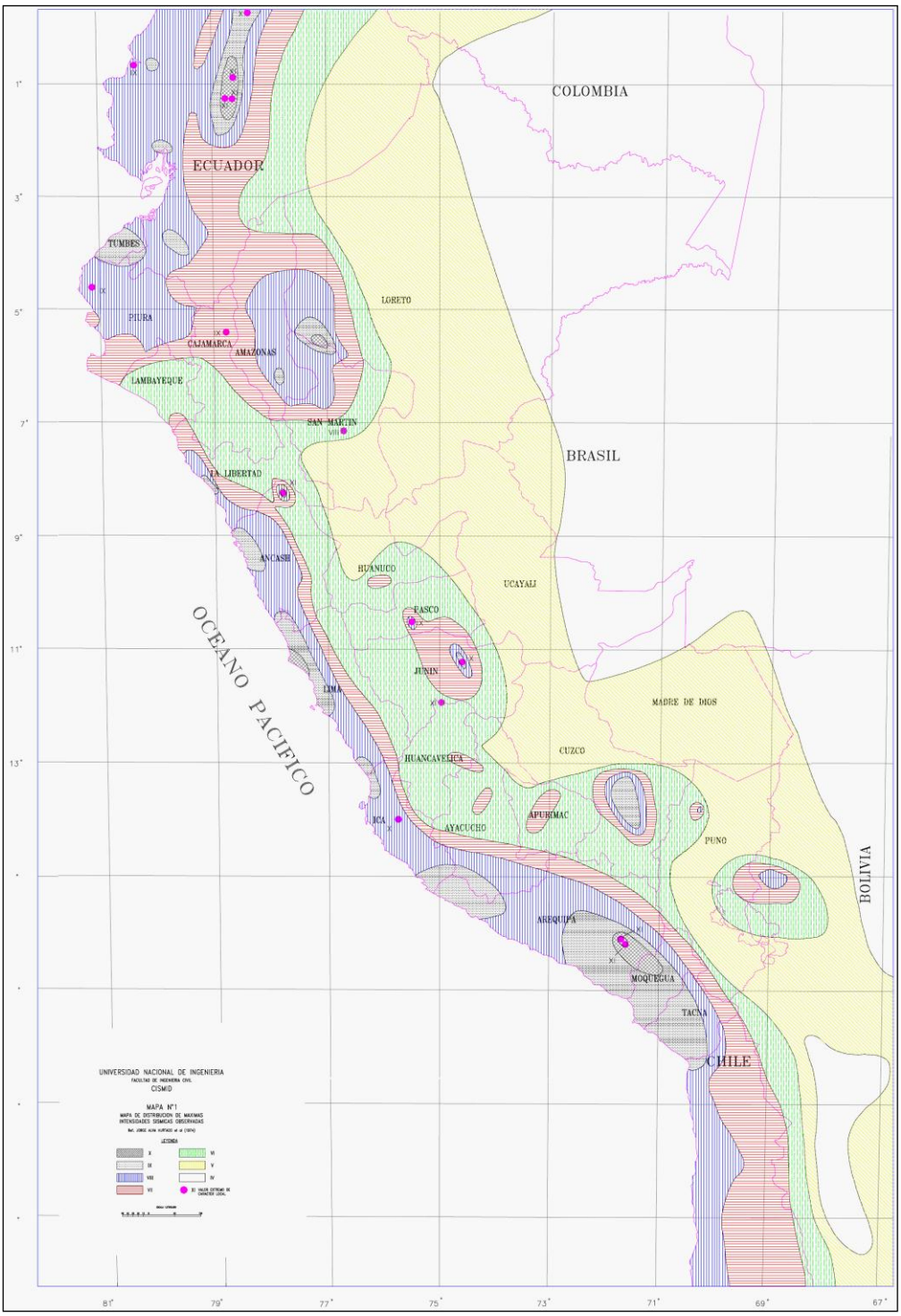

Figura 2. Mapa de intensidades máximas observadas del Perú.
Tomado de: Alva Hurtado (1984).

- Miyazawa, M., Mori, J. (2005). *Historical Maximum Seismic Intensity Maps in Japan from 1586 to 2004: Construction of Database and Application*.

Para la elaboración del mapa de intensidades máximas observadas en Japón, los autores hicieron una aproximación simple ya que utilizaron la distribución de las intensidades máximas históricas a lo largo del país. No utilizaron relaciones intensidad/magnitud ni relaciones de atenuación de la distancia para no crear dependencias con el modelo, por lo cual los mapas proveen un resultado directo de los sismos fuertes en Japón en los últimos 400 años.

Seleccionaron las intensidades (escala JMA) de 337 sismos ocurridos entre 1586 y 2004 y utilizaron diferentes fuentes de datos para generar mapas de intensidades máximas. Para cada evento, construyeron una distribución de la intensidad. Una intensidad *I* en un punto arbitrario *X* (excepto el punto de observación), se da por la interpolación lineal de las intensidades de *n* localidades vecinas cercanas a *X* como:

$$I(x) = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{1}{\Delta_i} / \sum_{j=1}^{n} \frac{1}{\Delta_j} \right) I_i$$

I_i es la intensidad de x_i y Δ_i es la distancia de x_i a x

Según los datos empleados resultaron diferentes productos. Por ejemplo, generaron un mapa utilizando todos los datos disponibles (*Figura 3a*); otro que tiene en cuenta los sismos relacionados directamente con el movimiento de las placas (*Figura 3b*); otro que tiene en cuenta otro tipo de sismos, es decir, los asociados a fallas activas y eventos volcánicos, entre otros (*Figura 3c*) y otro con una ventana de tiempo del último siglo (*Figura 3d*).

Los autores concluyeron que si bien existen algunos problemas cuando se utiliza la intensidad sísmica, debido al sesgo que genera la localización de las poblaciones, así como a que los documentos históricos son incompletos y a problemas de interpolación (cuando se utilizan isosistas), si no se utilizan modelos (como relaciones intensidad/magnitud o relaciones de atenuación de la distancia), los mapas de intensidad máxima proveen el resultado más directo para conocer la sismicidad histórica del país en los últimos 400 años.

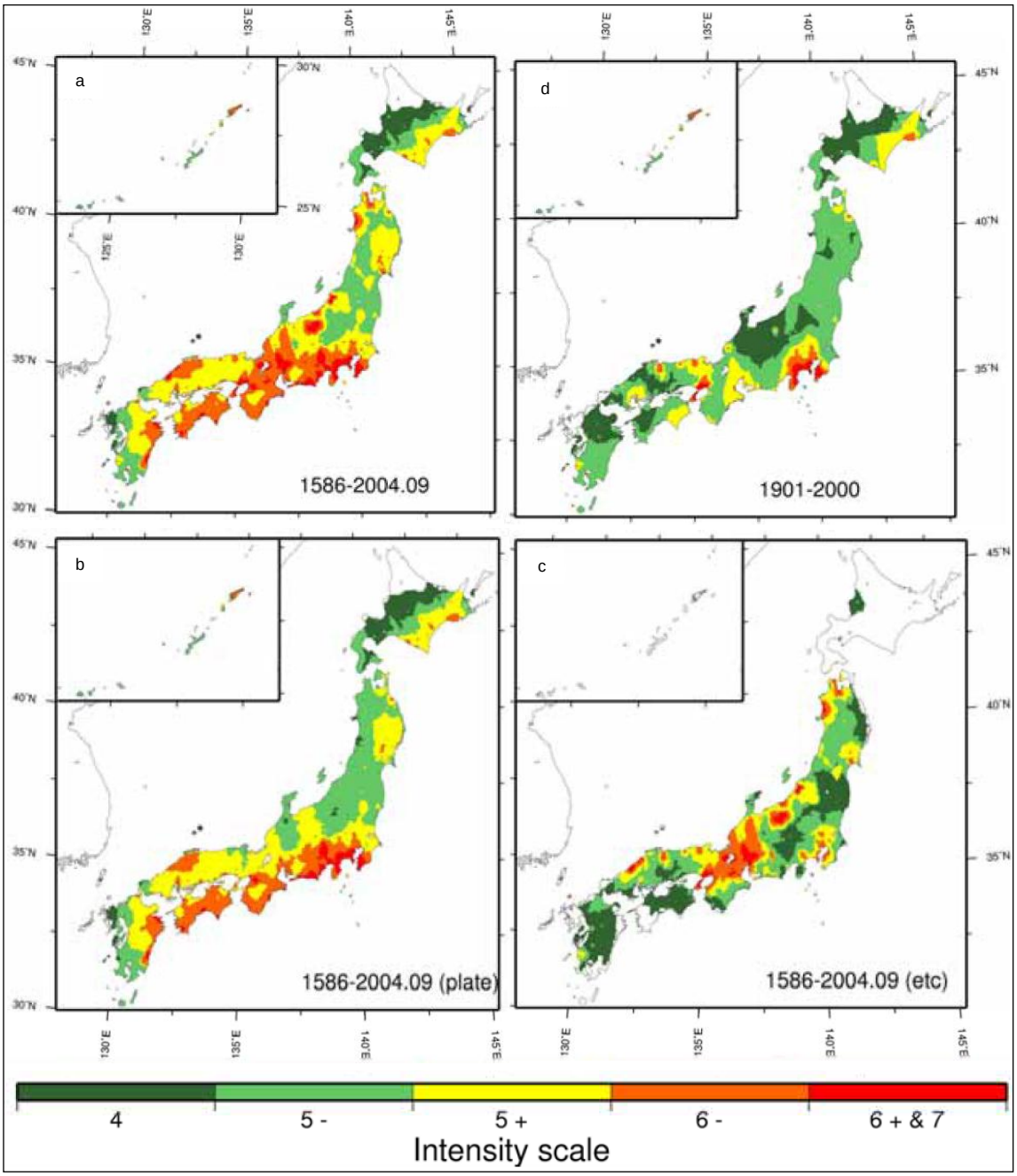

Figura 3. Mapas de intensidad máxima observada para Japón (Escala JMA)
a) 1586 a 2004 incluye intensidades de todos los sismos. b) Sismos de interplaca y en zonas de subducción. c) Otros eventos (p.e. sismos de fallas activas costeras, eventos volcánicos)
d) Sismos entre 1901-2000.
Tomado de: Miyazawa y Mori (2005)

- LEYU CHONG HUA. (2008). *Macroseismic Study of Malaysia.* "Forum on Seismic and Tsunami Hazards and Risk Studies in Malaysia, 15 July 2008".

Para elaborar el mapa de intensidades máximas observadas de Malasia, el autor reevaluó los valores de intensidad que se habían consignado en el primer reporte elaborado en 1985. Igualmente, evaluó las intensidades de nuevos eventos ocurridos entre 1985 y 2007 y extrajo las intensidades máximas por localidad; finalmente, graficó estos valores máximos y generó un mapa de isosistas.

El resultado incluyó un mapa de intensidades máximas de la zona peninsular de Malasia con una ventana de tiempo entre 1805 y 2007 y otro de la zona insular del país con una ventana de tiempo entre 1875 y 2007 (*Figura 4*).

La escala de intensidad utilizada fue la de Mercalli Modificada.

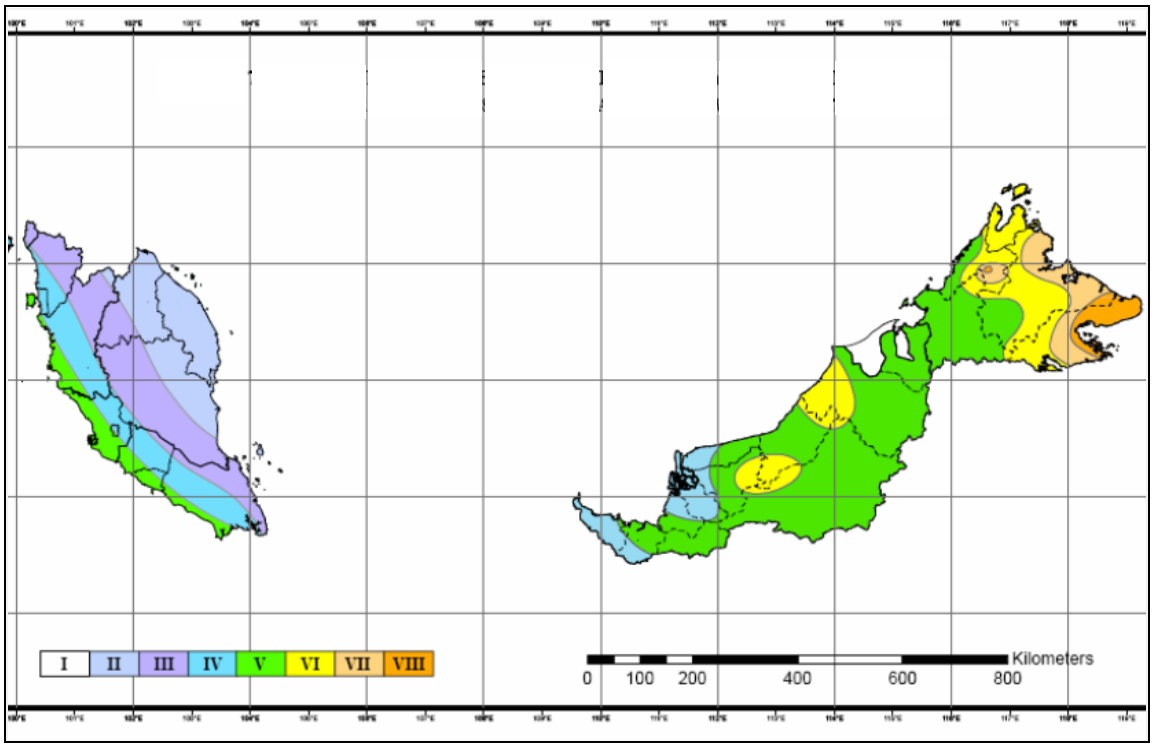

Figura 4. Mapa de intensidades máximas observadas de Malasia
Tomado de: Leyu Chong Hua (2008)

- SINGAUCHO, J. (2009). *Mapa de intensidades máximas del Ecuador. Criterios estructurales para mejorar la estimación de intensidades.* Escuela Politécnica Nacional, Quito.

Para elaborar el mapa de intensidades máximas observadas de Ecuador, el autor utilizó 20 mapas de isosistas con intensidad máxima ≥8, los cuales revisó y estandarizó a intensidades en la escala MSK. Posteriormente descartó dos eventos debido a que únicamente contaban con un punto de intensidad, para un total de 18 eventos.

El autor hizo pruebas de interpolación utilizando diversas metodologías:
- Superposición de isosistas: Esta es la metodología que tradicionalmente se ha utilizado para generar mapas de intensidad máxima observada. Consiste en superponer las líneas de las isosistas de cada sismo estudiado individualmente, y se determinan los puntos de intersección de esas líneas (*Figura 5a*).

- Contornos sobre los puntos de intensidad individuales: Se mantienen los valores más altos de intensidad de cada sitio. Posteriormente, se van añadiendo los puntos con intensidades bajas (*Figura 5b*).

- Método de la intensidad equivalente: Se transforma la intensidad sísmica en magnitud utilizando relaciones empíricas de la escala MM con la de Richter. Esta magnitud se transforma en energía y luego se convierte el logaritmo de los valores obtenidos en intensidades equivalentes.

En el trabajo se concluye que el primer método arrojó los resultados menos confiables ya que sobreestima las intensidades en todo el territorio. Las otras dos metodologías produjeron resultados similares, pero difirieron notablemente en la intensidad resultante de algunas zonas. La tercera metodología fue la que presentó mejores resultados, aplicando filtros para generar un perfil más suavizado y evitando cambios bruscos de intensidad en la misma zona (*Figura 5c*).

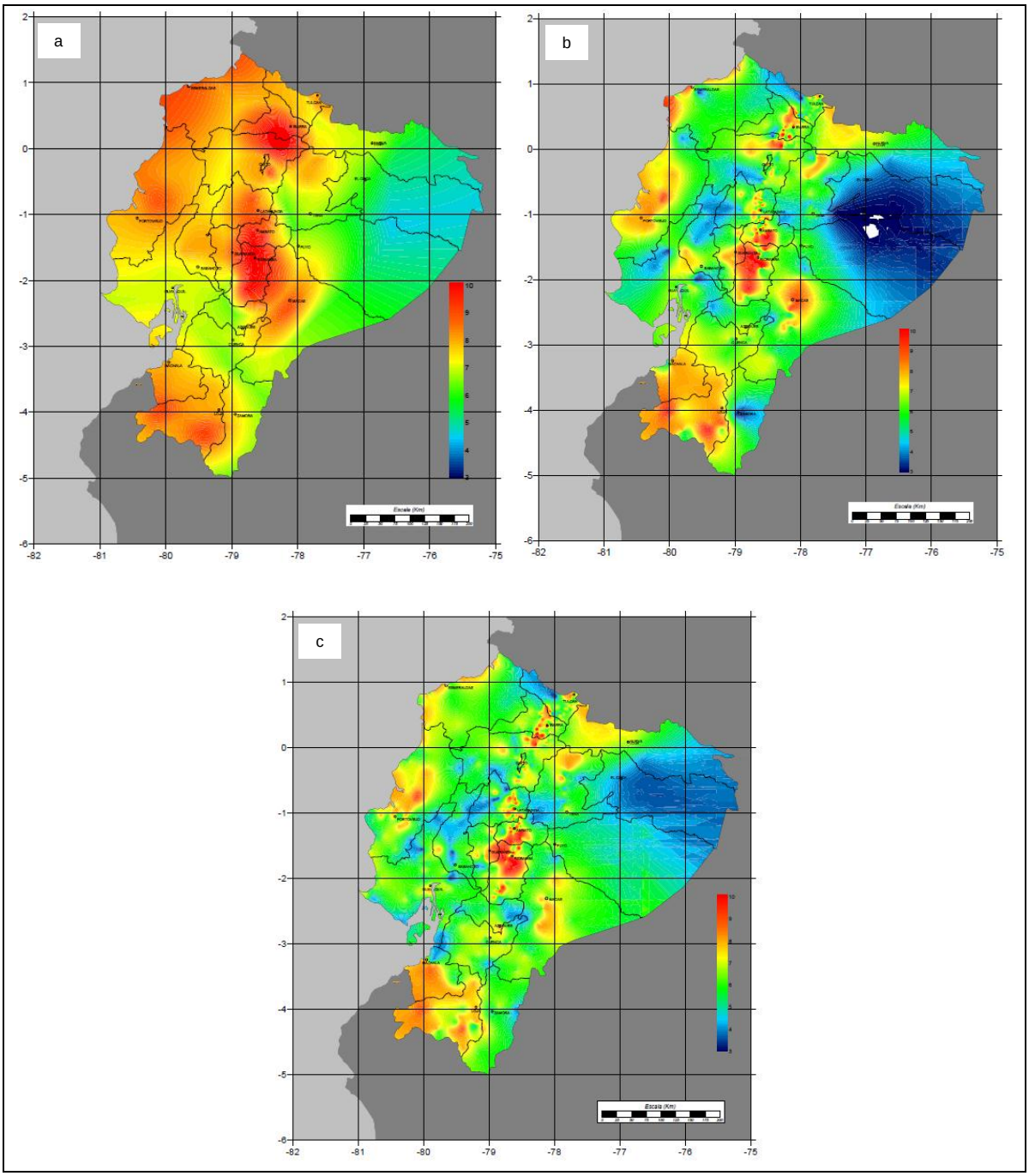

Figura 5. Mapas de intensidades máximas observadas para Ecuador
Tomado de: Singaucho (2009)

- AYADI, A., BEZZEGHOUD, M. (2015). *Seismicity of Algeria from 1365 to 2013: Maximum Observed Intensity Map (MOI_{2014}).* Seismological Research Letters.

El mapa de intensidades máximas observadas de Argelia fue elaborado teniendo en cuenta un conjunto de 421 sismos ocurridos entre 1365 y 2013, de los cuales únicamente se tuvo en cuenta la intensidad máxima. Resultaron más de 1.000 puntos de intensidad que fueron evaluados utilizando la escala de Mercalli Modificada.

En este estudio los autores actualizaron el último mapa de intensidades máximas observadas el cual había sido elaborado en 1996. Debido a que incluyeron eventos fuertes ocurridos en las últimas dos décadas, se observaron cambios significativos respecto al mapa anterior, principalmente en el occidente del país.

En la *Figura 6* se presenta el mapa resultante de la investigación llevada a cabo por Ayadi & Bezzghoud (2015).

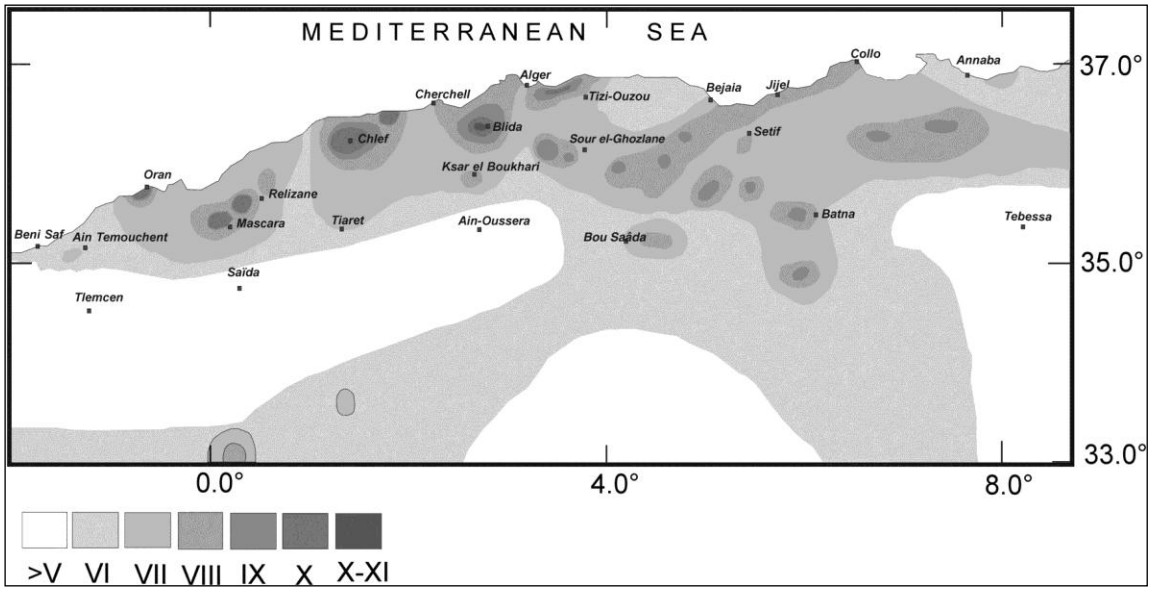

Figura 6. Mapa de intensidades máximas observadas de Argelia
Tomado de: Ayadi &Bezzeghoud (2015).

2. METODOLOGÍA

Para la elaboración del mapa de intensidades máximas observadas para Colombia, se tuvo en cuenta la información consignada en el Sistema de información de sismicidad histórica: http://agata.sgc.gov.co:9090/SismicidadHistorica/.

Se utilizaron las intensidades de 73 eventos ocurridos entre 1644 y 2013, evaluadas por el Servicio Geológico Colombiano y la Universidad Nacional de Colombia (SGC-UN) en la Escala Macrosísmica Europea de 1998 (EMS-98). Dos de estos sismos (2 de febrero de 1736 y 15 de febrero de 1796), no se utilizaron dado que contaban con un solo punto de intensidad.

El conjunto de datos de entrada se depuró teniendo en cuenta las intensidades ≥4 y con calidad de asignación buena o aceptable. Se realizó la interpolación de los puntos de intensidad seleccionados utilizando el software ArcGis – ArcMap 10.2.2- y el método *Kriging,* el cual es un procedimiento geoestadístico avanzado que genera una superficie estimada a partir de un conjunto de puntos dispersos con valores *z* y proporciona alguna medida de certeza o precisión de las predicciones (*ArcGis Resource Center*).

Se utilizó el método *Kriging ordinario*, el cual presupone que el valor medio constante es desconocido. No se aplicó ningún tipo de transformación y se empleó un perfil suavizado. Las dos metodologías empleadas se describen a continuación:

1. Superposición de puntos de intensidad: en este caso se eligió el valor máximo de intensidad de cada uno de los sitios donde históricamente se ha evaluado intensidad (*Figura 7*).

Se analizó la distribución de los datos mediante el histograma (*Figura 8*), en el cual se observa que se utilizaron 843 puntos de intensidad y su distribución es normal. El coeficiente de variación de los datos es de un 20% lo cual es adecuado, los valores de la media y la mediana son similares y el coeficiente de asimetría (skewness) es ligeramente menor que 0 (-0.18), pero se acepta como distribución normal.

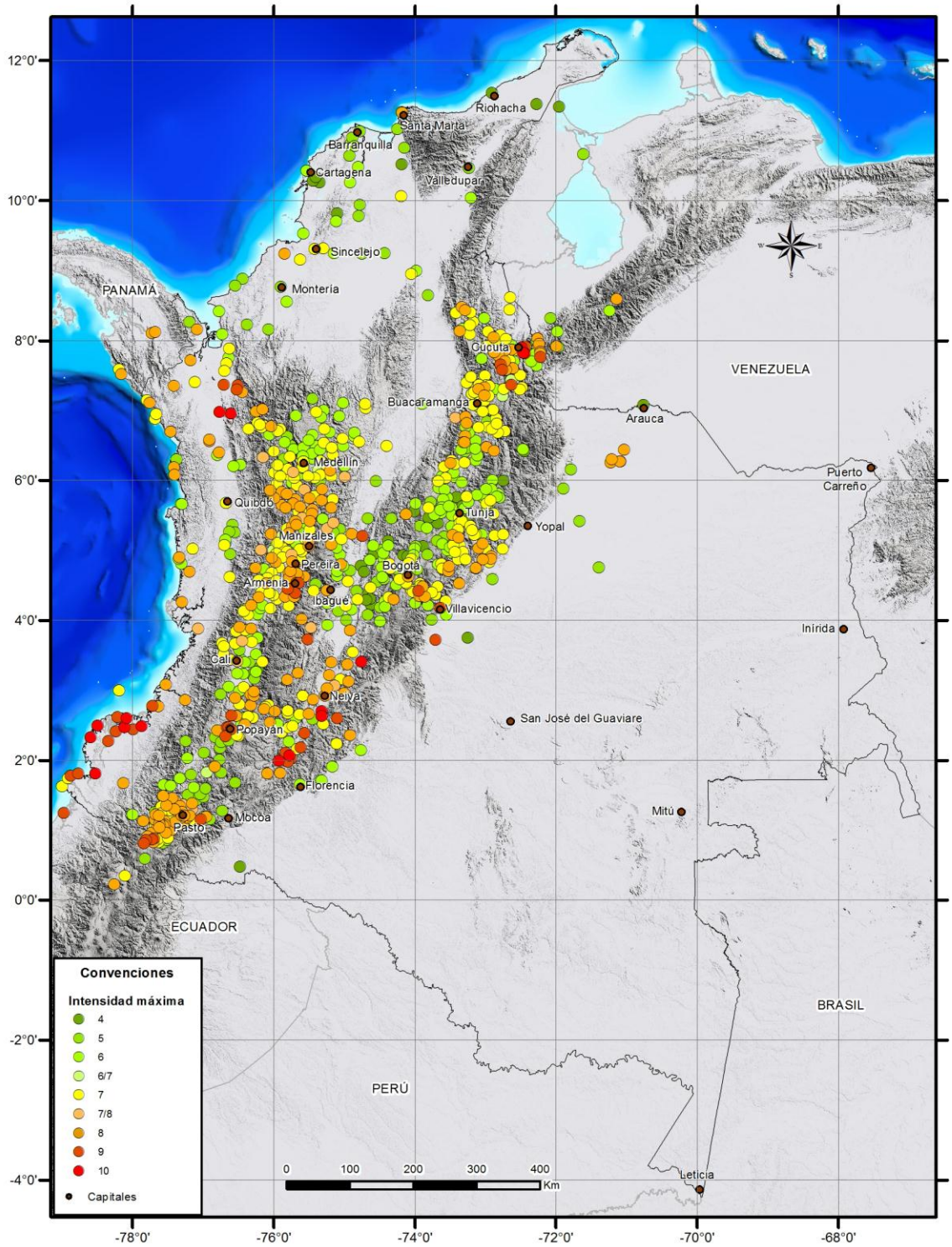

Figura 7. Puntos de intensidad máxima por localidad.

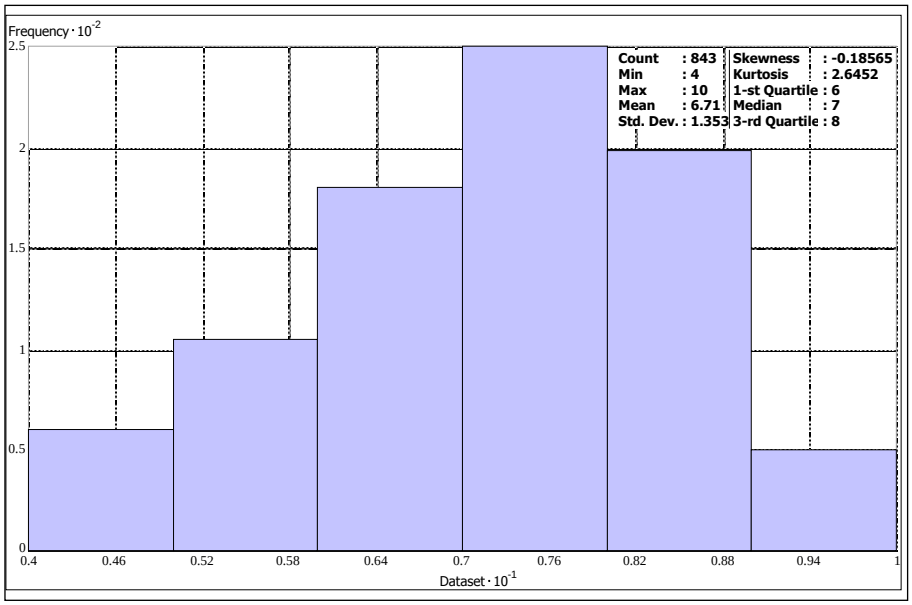

Figura 8. Histograma puntos de intensidad - Superposición

2. Intensidad equivalente: Teniendo en cuenta que en el trabajo de Singaucho (2009), fue el método más adecuado para elaborar el mapa de intensidades máximas observadas, se aplicó a las intensidades que se han registrado históricamente en Colombia, utilizando las siguientes ecuaciones:

Para convertir la intensidad a magnitud: $M = 0.612(I) + 1.172$

Para convertir la magnitud en energía: $\log_{10}E = 1.5M + 11.8$

Energía máxima en cada localidad: $I\,eq = 1.054\,(\log_{10}(\Sigma E)) - 14.15$

Para aplicar esta metodología se tuvieron en cuenta todos los valores de intensidad (en total 2080) que históricamente se han registrado en todos los sitios. Después de aplicar las ecuaciones mencionadas y establecer el valor de intensidad equivalente para los 843 sitios, se obtuvo el histograma que presenta unas estadísticas muy similares a las obtenidas utilizando solo las intensidades máximas, e igualmente presenta una distribución normal con una ligera asimetría negativa (*Figura 9*).

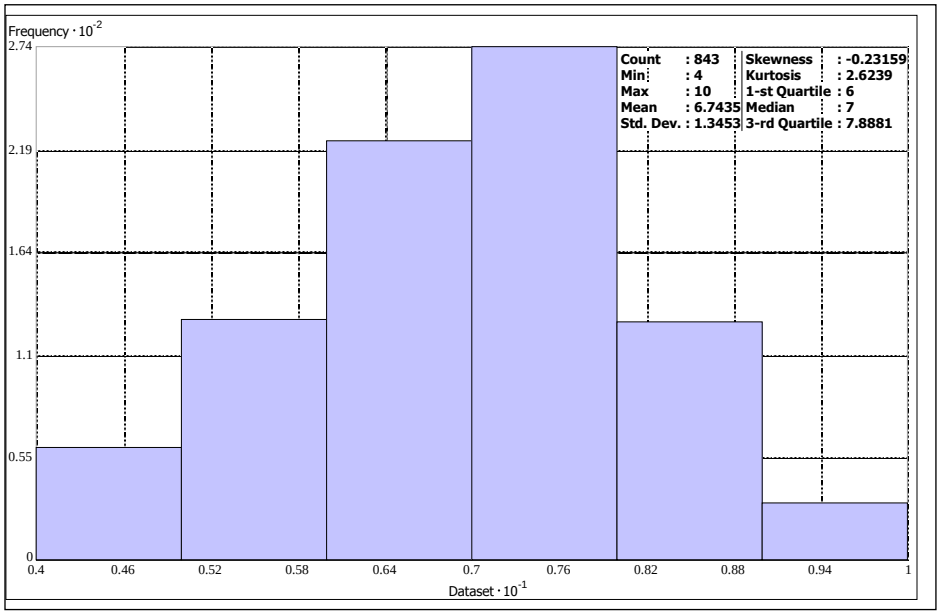

Figura 9. Histograma puntos de intensidad – Intensidad equivalente

Teniendo en cuenta los datos presentados en los histogramas (*Figura 8* y *9*), se espera que la diferencia entre los dos métodos sea mínima.

3. RESULTADOS

Superposición de intensidades: se tuvieron en cuenta las intensidades máximas ≥4 que se han registrado históricamente en cada localidad. En las *Figuras 10* a *18*, se presenta la distribución geográfica de cada una de esas intensidades.

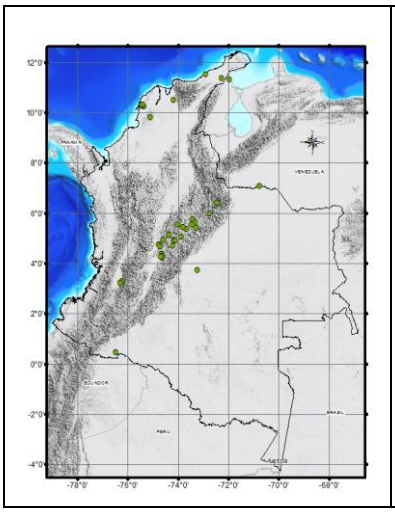

Figura 10. Intensidad 4

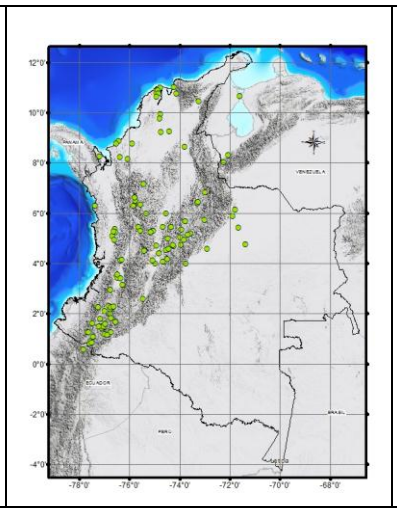

Figura 11. Intensidad 5

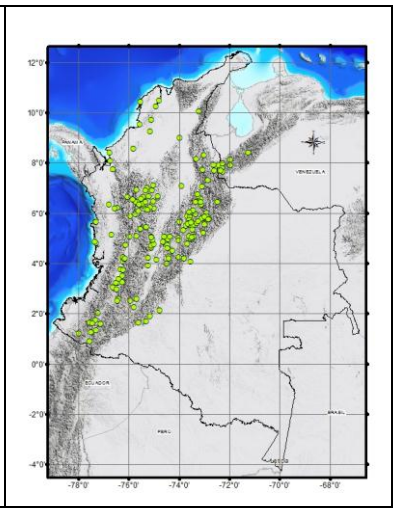

Figura 12. Intensidad 6

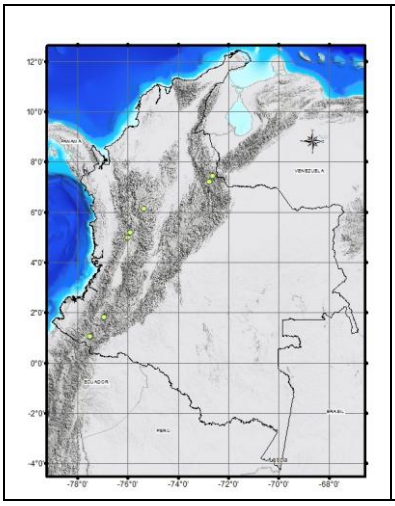

Figura 13. Intensidad 6/7

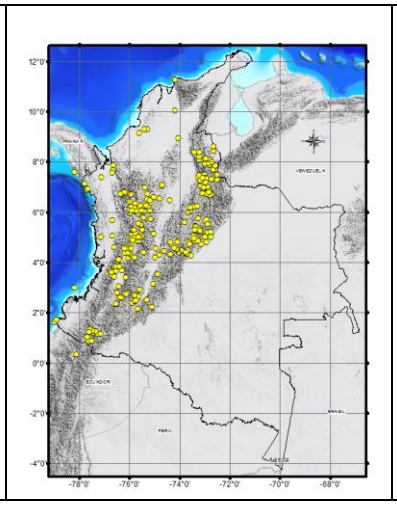

Figura 14. Intensidad 7

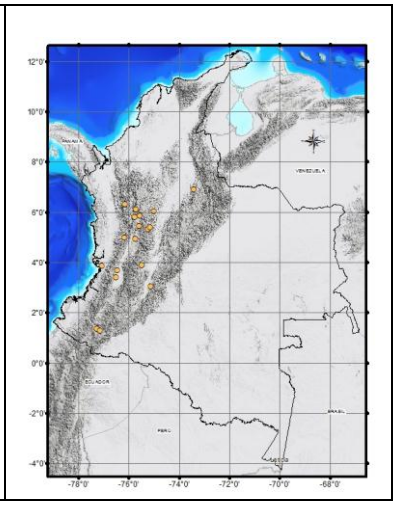

Figura 15. Intensidad 7/8

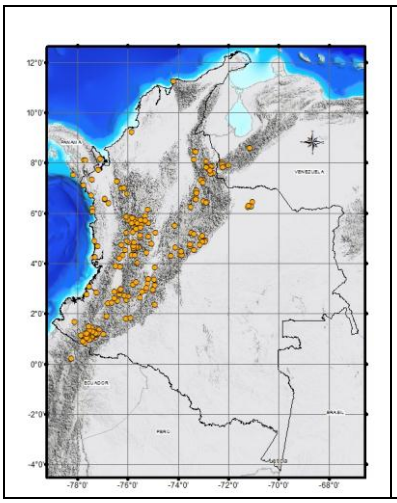

Figura 16. Intensidad 8

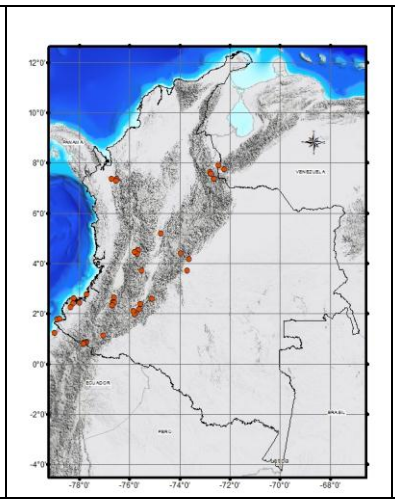

Figura 17. Intensidad 9

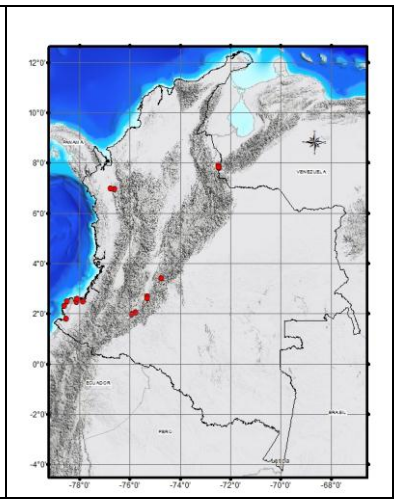

Figura 18. Intensidad 10

El resultado de la interpolación utilizando la superposición de puntos de intensidad máxima por localidad se observa en la *Figura 19*. Una breve explicación del significado de cada una de las intensidades en la escala EMS-98 se presenta en la *Tabla 1*.

En la *Figura 19* se observa que las regiones donde históricamente se han presentado intensidades bajas (4 a 6), han sido Caribe, Orinoquía y Amazónica. También se presentan zonas de baja intensidad al norte de los departamentos de Cundinamarca y Boyacá y sur del departamento del Cauca.

Los grados de intensidad 6 y 7, que corresponden a intensidad moderada con daños perceptibles, resultaron en el piedemonte oriental de la Cordillera Oriental, en áreas de los departamentos de Santander y Antioquia, y parte de la región Pacífica incluyendo a Cali y Quibdó.

Los grados de intensidad que causan daños severos y destrucción (8 – 10), resultaron en el Eje Cafetero, Norte de Santander, Huila, norte del Chocó y el litoral pacífico de Nariño y Cauca.

Ciudades como Bogotá, Cali y Santa Marta donde históricamente se ha presentado intensidad 8, es decir daños severos en las edificaciones, se observa que quedaron dentro de la zona de intensidad 6 - 7. Este hecho se puede atribuir a la influencia de numerosas intensidades bajas en poblaciones cercanas a esas ciudades.

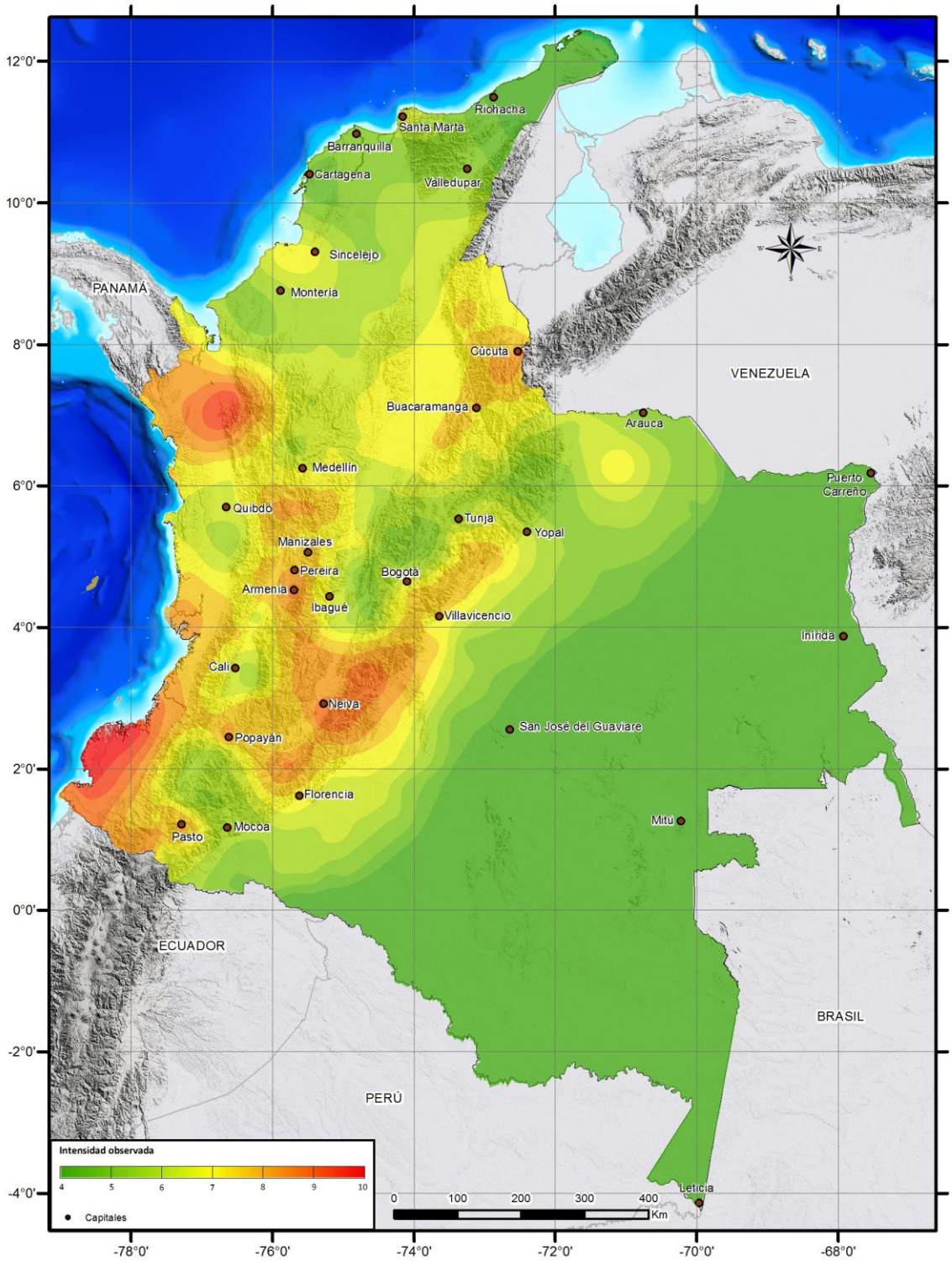

Figura 19. Intensidad máxima observada – Superposición de intensidades

Tabla 1. Versión abreviada de la escala EMS-98.

Intensidad EMS-98	Definición	Tipo de efectos
1	No sentido	No se siente.
2	Sentido levemente	Sentido por muy pocas personas que se encuentran en reposo dentro de viviendas.
3	Débil	Sentido en el interior de viviendas por pocas personas. La gente en reposo siente una oscilación o temblor leve. Objetos colgantes se mecen levemente.
4	Observado ampliamente	Sentido por muchas personas en el interior de edificaciones y por pocos en el exterior. Pocas personas se despiertan. Las ventanas, puertas y platos vibran.
5	Fuerte	Sentido por casi todos en el interior de edificaciones y por pocos en el exterior. Muchas personas dormidas se despiertan. Algunos se asustan y salen a la calle. Los edificios tiemblan en su totalidad. Objetos pequeños se desplazan. Las puertas y ventanas se abren y cierran y los líquidos oscilan y se pueden derramar. Se pueden presentar leves grietas en muros de edificaciones altamente vulnerables.
6	Daños leves	Mucha gente se asusta y corre a la calle. Algunas personas pierden el equilibrio. Algunos objetos caen. Muchas viviendas sufren daños leves no estructurales, como grietas en muros y caída de partes del revestimiento.
7	Daños moderados	La mayoría de la gente se asusta y corre al exterior. Los muebles son desplazados y caen objetos de repisas. Muchos edificios ordinarios bien construidos sufren daños moderados: grietas largas en muros, caída de revestimiento en gran proporción, caída de partes de chimeneas. Los edificios más vulnerables pueden mostrar grandes grietas en los muros y fallas en las paredes y muros divisorios.
8	Daños severos	A mucha gente le cuesta mantenerse de pie. Se pueden desplazar o volcar los muebles pesados. Unos pocos edificios ordinarios bien construidos muestran daños serios en los muros, mientras que las estructuras antiguas y débiles pueden colapsar.
9	Destructivo	Pánico general. Muchas construcciones débiles colapsan. Incluso los edificios ordinarios bien construidos muestran daños serios: fallas graves en los muros y fallas estructurales parciales.
10	Muy destructivo	Muchos edificios ordinarios bien construidos colapsan.
11	Devastador	La mayoría de los edificios ordinarios bien construidos colapsan, incluso algunos con buen diseño sismorresistente
12	Totalmente devastador	Casi todos los edificios son destruidos.

En la *Figura 20* se presenta el mapa de intensidad máxima observada aplicando el método de superposición de intensidades, junto a los puntos de intensidad máximos observados por localidad.

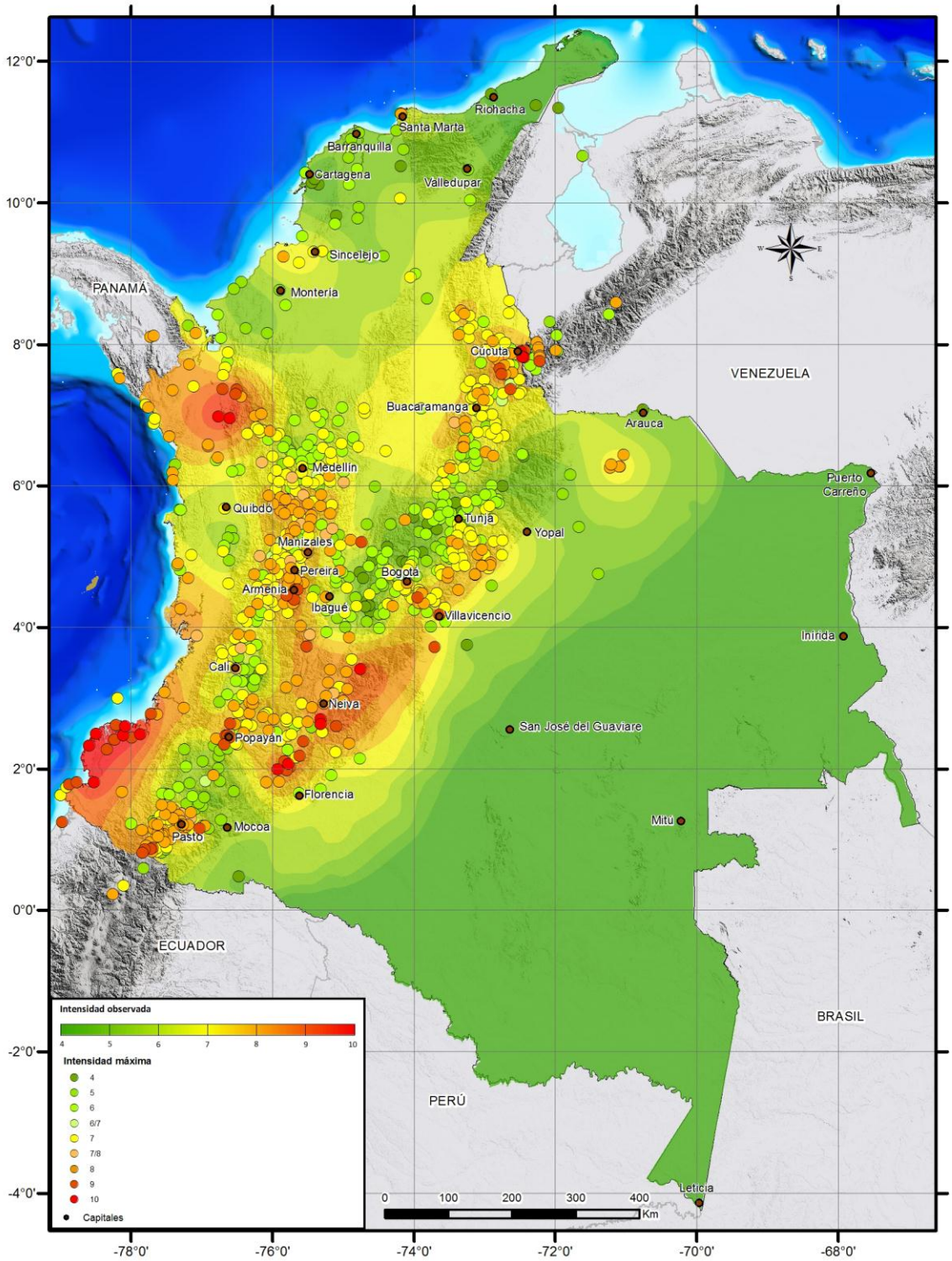

Figura 20. Intensidad máxima observada y puntos de intensidad

Con el fin de observar el ajuste de la interpolación, se presentan los errores obtenidos:
Root-Mean-Square: 0.9929
Average Standard Error: 1.0148
Root-Mean-Square Standardized: 0.9950

El RMS y el error estándar promedio son cercanos y el error medio cuadrático estandarizado es cercano a 1, lo cual indica que el modelo es apropiado. Adicionalmente, en la *Figura 21* se presenta el mapa de errores obtenido, en el cual se observa que el error máximo es de 1.60, dando una confiablidad del modelo de un 98.4%.

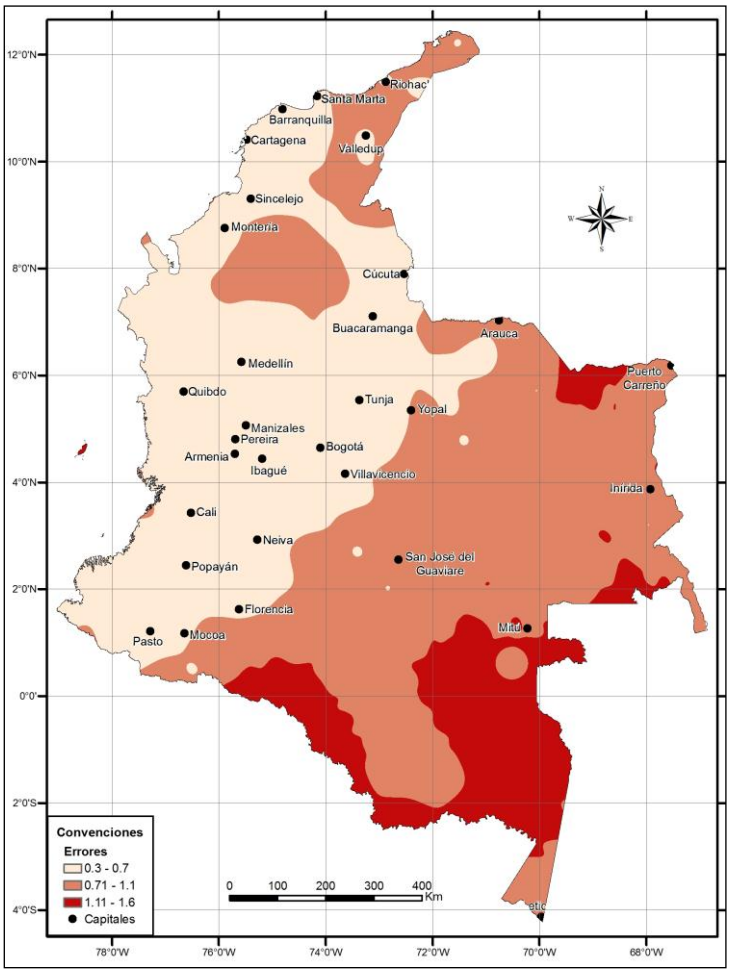

Figura 21. Errores de interpolación – Superposición de intensidades

En la *Figura 21* se observa que los errores más altos (>0.7) se presentan en las zonas en las cuales se cuenta con pocos puntos de intensidad sísmica, es decir la región Caribe, Amazónica y Orinoquía.

- Intensidad equivalente: Al aplicar las ecuaciones mencionadas en la Metodología, se obtuvo un valor que relaciona la intensidad con la energía que se ha transmitido en cada localidad a causa de todos los sismos que se han sentido o la han afectado.

El resultado se presenta en la *Figura 22* y como se mencionó anteriormente, debido a la similitud de los valores, se esperaba obtener un mapa parecido al obtenido utilizando el método de superposición de intensidades. Un ejemplo de la escasa diferencia entre los valores de intensidad máxima utilizados para elaborar el mapa de superposición de intensidades y los valores resultantes al aplicar la metodología de la intensidad equivalente se presenta en la *Tabla 2*.

Tabla 2. Comparación intensidad máxima – intensidad equivalente.

CIUDAD	INTENSIDAD MÁXIMA	INTENSIDAD EQUIVALENTE
Cúcuta	10.0	9.82
Villavicencio	9.0	8.85
Armenia	9.0	8.89
Ibagué	8.0	8.01
Neiva	8.0	8.23
Bogotá	8.0	8.18
Santa Marta	8.0	7.88
Pasto	8.0	8.24
Popayán	9.0	8.92
Pereira	8.0	8.33
Manizales	8.0	8.13
Cali	7.5	8.06
Sincelejo	7.0	6.92
Bucaramanga	7.0	7.21
Medellín	7.0	7.38
Quibdó	7.0	7.56
Florencia	6.0	6.29
Cartagena	6.0	6.17
Tunja	6.0	6.47
Valledupar	5.0	5.08
Barranquilla	5.0	5.64
Mocoa	5.0	5.00
Montería	5.0	5.35
Riohacha	4.0	4.00
Arauca	4.0	4.00

La diferencia más notable entre el mapa elaborado mediante superposición de intensidades (*Figura 19*) y el de intensidad equivalente (*Figura 22*), es que la intensidad máxima observada en algunas capitales como Bogotá, Quibdó y Pasto aumentaron, siendo más coherente con lo que ha sucedido históricamente.

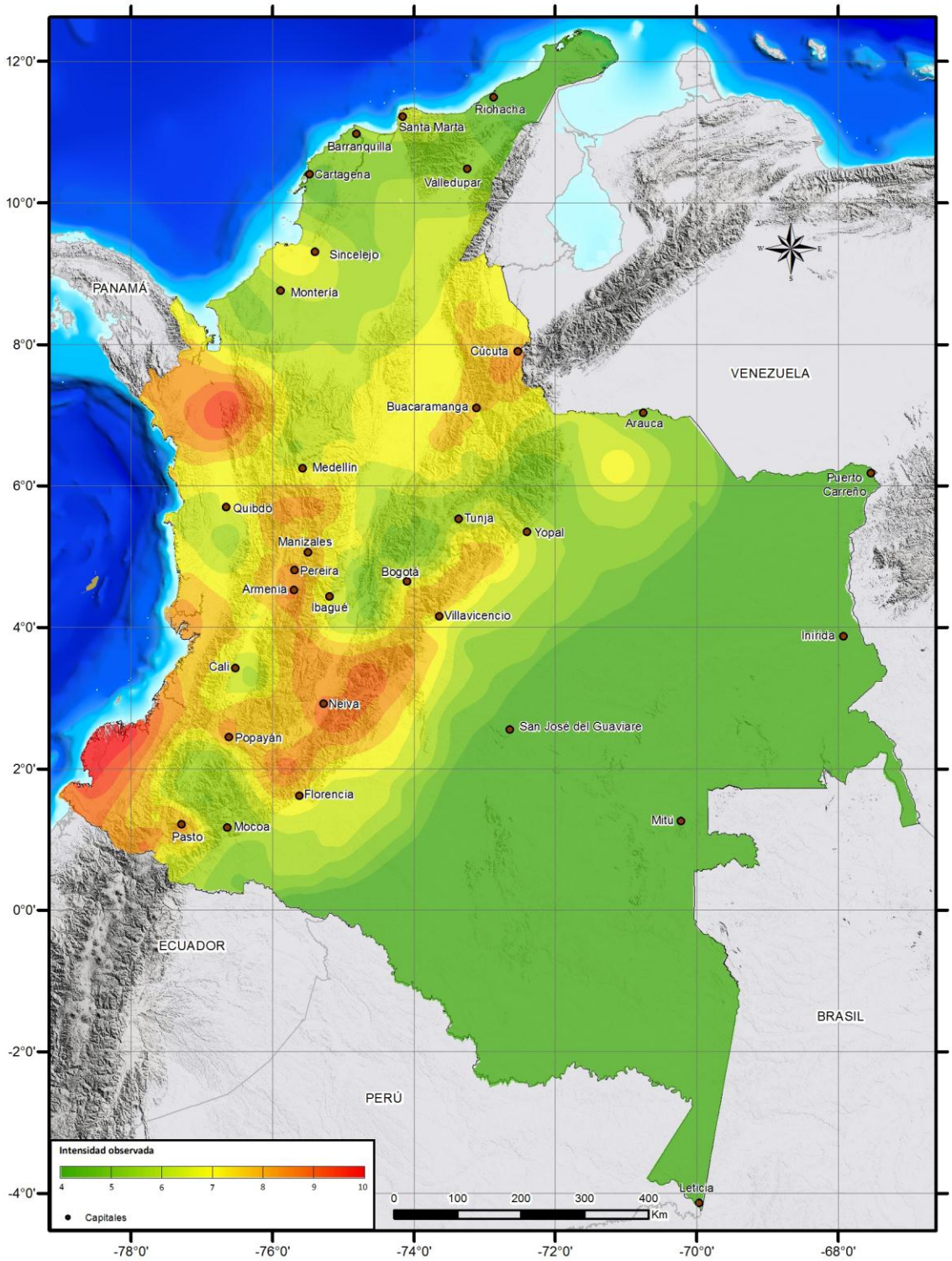

Figura 22. Intensidad máxima observada – Intensidad equivalente.

Dado que el mapa elaborado mediante la intensidad equivalente mejora la asignación de intensidad de algunas poblaciones, se adopta éste como representación de las intensidades máximas observadas para Colombia.

Con el fin de observar el ajuste de la interpolación, se presentan los errores obtenidos:
Root-Mean-Square: 0.9859
Average Standard Error: 1.0122
Root-Mean-Square Standardized: 0.9903

Los errores son muy similares a los obtenidos siguiendo la metodología de superposición de intensidades, aunque el RMS de este modelo es ligeramente menor, así que este modelo es igualmente apropiado. El mapa de errores se presenta en la *Figura 23*.

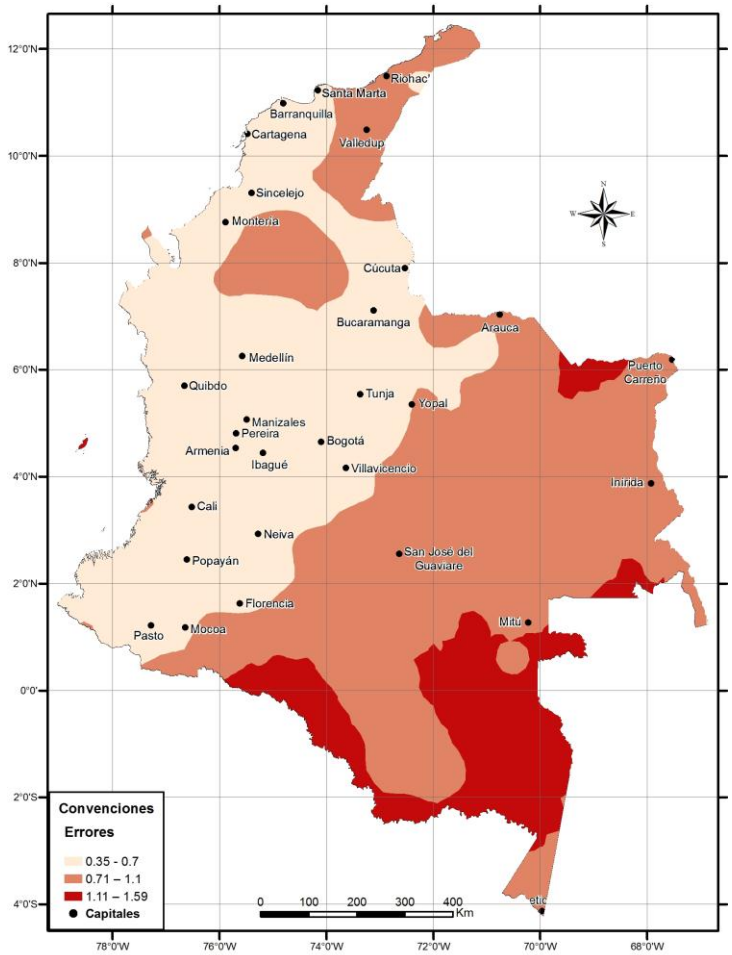

Figura 23. Errores de interpolación – Intensidad equivalente

3.1 COMPARACIÓN CON MAPA POTENCIAL DE DAÑO

Como ejercicio final, se realizó la comparación del mapa de intensidades máximas observadas resultante, con un mapa de percepción de movimiento y potencial de daño, para un período de retorno de 475 años (Eraso, 2015), el cual se presenta en la *Figura 24*.

Para elaborar el mapa de percepción de movimiento y potencial de daño el autor siguió la metodología de Wald & Allen (2007), en la que se estiman condiciones de sitio a partir de la topografía. Para eso utilizó un Modelo Digital de Elevaciones de 30 arcosegundos, y determinó el gradiente topográfico el cual relacionó con rangos de observaciones superficiales de onda de corte con el fin de obtener el promedio de velocidad de onda de corte a 30 m de profundidad (Vs30).

Posteriormente utilizó la información de Vs30 y el nivel de movimiento del suelo a partir del mapa de amenaza sísmica de Colombia para calcular los factores de amplificación y determinar la aceleración máxima horizontal (PGA) usando los valores de aceleración en roca para un período de retorno de 475 años y con 10% de probabilidad de ser superado en los próximos 50 años. Finalmente, utilizó la relación de Wald *et al.* (1999) para calcular las intensidades, relacionándolas con la percepción de movimiento y potencial de daño.

Para realizar la comparación del mapa de intensidades máximas observadas con el de percepción de movimiento y potencial de daño se requirió pasar los valores de intensidad del primero, a valores de PGA utilizando la relación propuesta por Wald *et al.* (1999):

$$I_{mm} = 3.66 \log(PGA) - 1.66 \qquad (\sigma = 1.08)$$

Aunque esta relación utiliza la intensidad en escala Mercalli Modificada, en este caso se emplea directamente a modo de ejemplo y se espera en un futuro probar otras relaciones y elaborar una nueva que se ajuste a los datos existentes de los sismos colombianos y a la escala de intensidad EMS-98. La relación de intensidad y PGA se presenta en la *Tabla 3*.

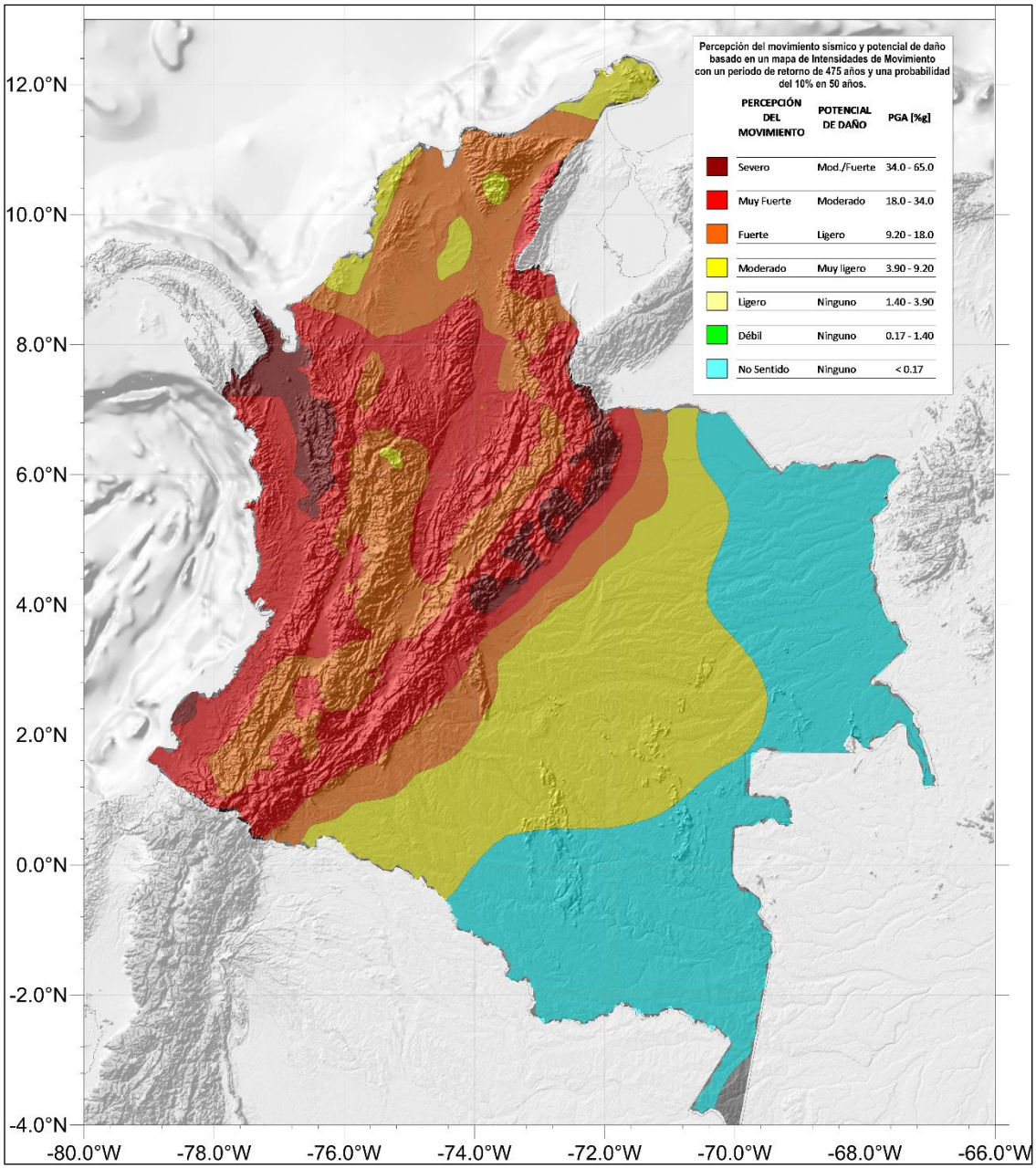

Figura 24. Mapa de percepción del movimiento y potencial de daño
Tomado de: Eraso (2015)

Tabla 3. Relación intensidad – PGA (Wald *et al.*, 1999).

Intensidad	PGA (%g)
1	<0.17
2-3	0.17 - 1.4
4	1.4 – 3.9
5	3.9 – 9.2
6	9.2 - 18
7	18 - 34
8	34 - 65
9	65 - 124
10+	>124

Teniendo los dos mapas expresados en PGA, se calculó la diferencia de los valores de píxel restando los valores del mapa de potencial de daño al mapa de intensidades observadas y el resultado se presenta en la *Figura 25*. Igualmente se muestra el histograma de este mapa en la *Figura 26*, en el cual se indican los rangos utilizados y en color rojo el porcentaje de píxeles por intervalo.

La zona de color verde que se observa en el mapa de diferencias (*Figura 25*), corresponde al mejor ajuste de los valores de ambos mapas, es decir, donde lo que se ha observado históricamente es similar a lo que se propone teóricamente. Esta zona incluye la región Amazónica y gran parte de las regiones Caribe, Pacífica y Orinoquía, y tiene una diferencia de PGA entre -10% g y 10% g. En la *Figura 26* se observa que la mayor concentración de píxeles (77,5%) se encuentra en este rango.

Las áreas de color amarillo y naranja corresponden a los lugares donde se han observado valores menores a los que se espera obtener. Los valores de PGA de esas áreas tiene una diferencia menor que -10% g y se observan principalmente en parte de los departamentos de Boyacá, Casanare, Cundinamarca y Santander.

Por su parte, las zonas de color azul y violeta corresponden a aquellas donde se han observado valores altos de intensidad (PGA) pero lo que se indica teóricamente es menor. Estas áreas se observan principalmente en el borde oriental de la Cordillera Oriental, Eje Cafetero y costa pacífica del departamento de Nariño.

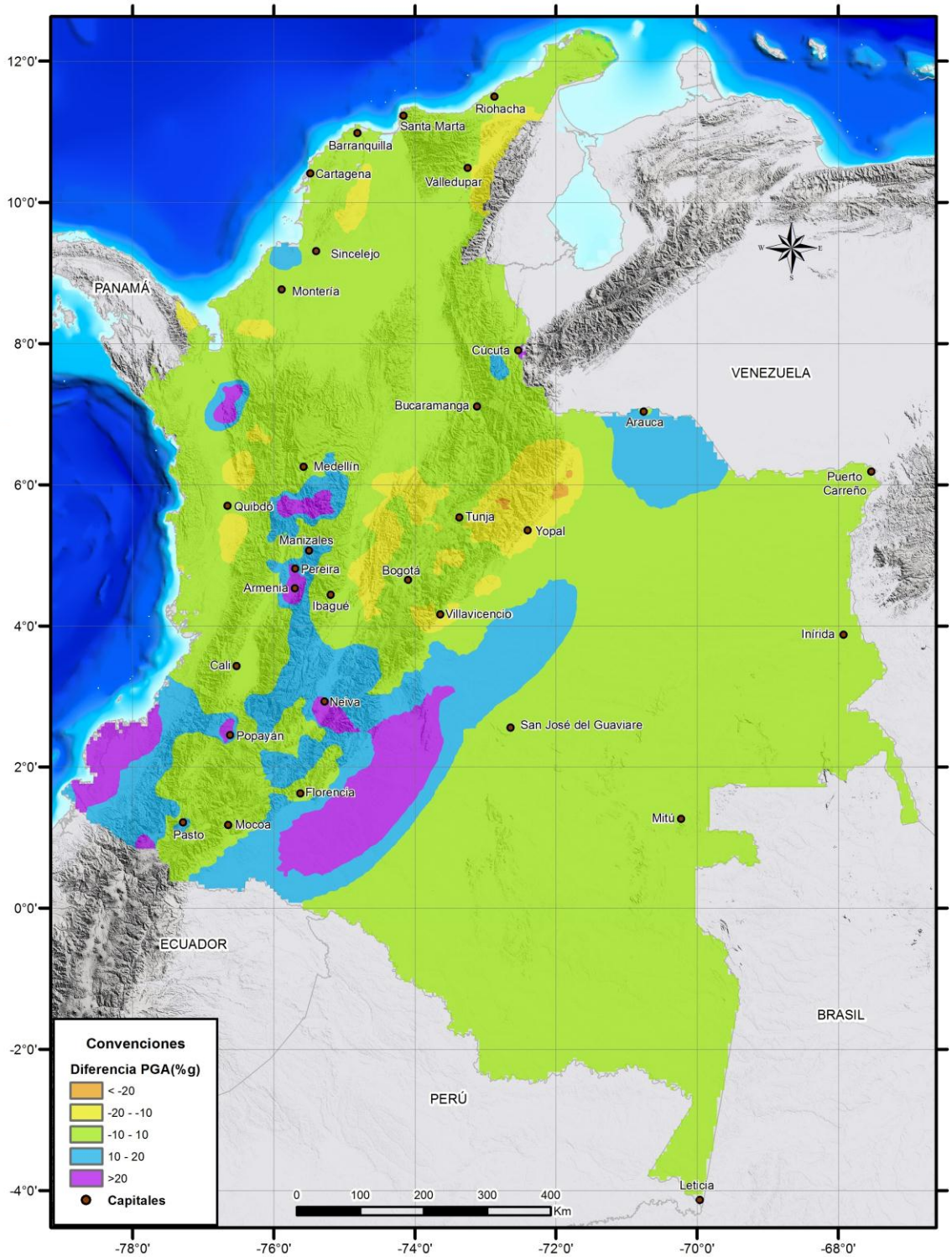

Figura 25. Mapa de diferencias de intensidades observadas y potencial de daño.

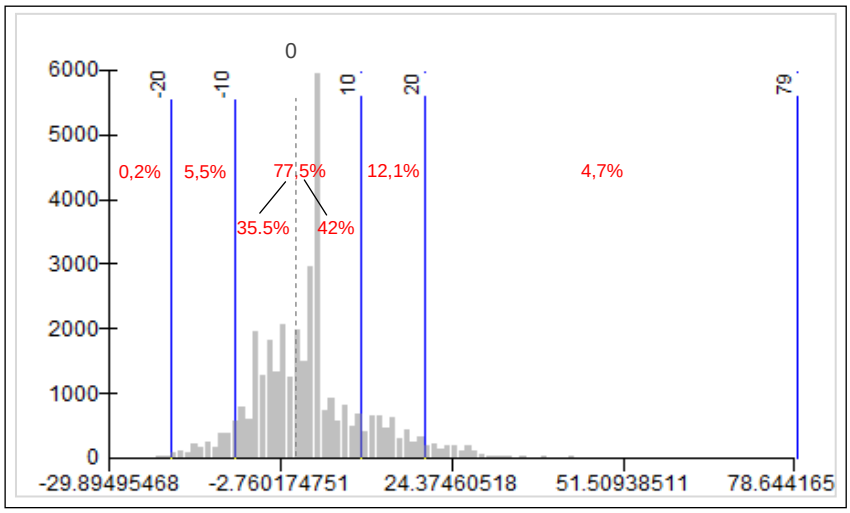

Figura 26. Histograma diferencia de valores PGA (%g).

En el caso de las áreas color violeta la diferencia entre los dos mapas ha sido de hasta casi 80% g (800 gales), lo cual se debe a que el valor máximo del mapa de potencial de daño es de 41% g y el de intensidad observada convertido a PGA es 120% g.

La amplia diferencia entre los valores máximos de los dos mapas se debe a que el mapa de intensidades máximas observadas lleva implícita la vulnerabilidad de las construcciones, mientras que el mapa de potencial de daño tiene en cuenta el movimiento del suelo pero no la vulnerabilidad.

Por ejemplo, los altos valores que se registran en el borde oriental de la Cordillera Oriental se deben al aporte de las altas intensidades registradas durante los sismos ocurridos el 16 de noviembre de 1827 al sur del Huila y el 9 de febrero de 1967 en el norte del Huila, los cuales tuvieron intensidad máxima 10 (>124% g). Varias poblaciones quedaron destruidas durante esos eventos debido a la alta vulnerabilidad de las construcciones. Caso similar se presenta en la costa pacífica, dada la ocurrencia de los sismos del 31 de enero de 1906 y 12 de diciembre de 1979, también con intensidad máxima 10.

En el Eje Cafetero se han registrado varios sismos de profundidad intermedia con intensidad máxima 8 (4 de febrero de 1938, 30 de julio de 1962, 23 de noviembre de 1979), pero el sismo que aportó valores más altos de intensidad fue el ocurrido el 25 de enero de 1999, de profundidad superficial e intensidad máxima 9 (65 - 124% g). Al igual que con los sismos anteriores, la alta intensidad fue causada principalmente por la alta vulnerabilidad física de las poblaciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVA, J., MENESES, J., GUZMÁN, V. (1984). *Distribución de máximas intensidades sísmicas observadas en el Perú*. Ponencia presentada en el V Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Tacna, 12-18 Noviembre de 1984.

ArcGis Resource Center. <http://help.arcgis.com/es/arcgisdesktop/10.0/help/> [Consulta: 15 ene. 2015].

ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA - AIS - (1996). *Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia*. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, Universidad de los Andes, INGEOMINAS. Bogotá.

AYADI, A., BEZZEGHOUD, M. (2015). *Seismicity of Algeria from 1365 to 2013: Maximum Observed Intensity Map (MOI_{2014}).* Seismological Research Letters. Volume 86, Number 1.

CERESIS. (1985). *Mapa de intensidades máximas en América del Sur.* Serie SISRA. Volumen 12.

ERASO MARTÍNEZ, J. (2015). *Mapa de percepción del movimiento sísmico y potencial de daño para Colombia.* Servicio Geológico Colombiano. Informe interno.

ESTRADA URIBE, G., RAMÍREZ, J. (1977). *Mapa de riesgo sísmico*. Instituto Geofísico Universidad Javeriana. Bogotá.

MIYAZAWA, M., MORI, J. (2005). *Historical Maximum Seismic Intensity Maps in Japan from 1586 to 2004: Construction of Database and Application*. En: "Annuals of Disaster Prevention Research Institute" Kyoto University, No. 48C.

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO. *Sismicidad histórica de Colombia*. Disponible en: <http://agata.sgc.gov.co:9090/SismicidadHistorica/> [Consulta: 15 nov. 2014]

SINGAUCHO ARMAS, J. (2009). *Mapa de intensidades máximas del Ecuador. Criterios estructurales para mejorar la estimación de intensidades.* Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental. Proyecto para optar al título de ingeniero civil. Quito - Ecuador.

WALD, D., QUITORIANO, V., HEATON, T., KANAMORI, H. (1999). *Relations between Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Modified Mercalli Intensity in California.* En: "Earthquake Spectra", Vol. 15, No. 3.

WALD, D., ALLEN, T. (2007). *Topographic slope as a proxy for seismic site conditions and amplification*. Bulletin of the Seismological Society of America. Vol. 97 No. 5. pp. 1379-1395.