

Evaluación probabilista de la amenaza sísmica a nivel mundial Probabilistic seismic hazard assessment at global level

Mario G. Ordaz^{*1}, Omar Darío Cardona², Mario A. Salgado Gálvez³, Gabriel

A. Bernal Granados³, Shri Krishna Singh⁴, Daniela Zuloaga Romero⁵

¹Instituto de Ingeniería, UNAM, México; ²Instituto de Estudios Ambientales, Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales; ³CIMNE, Universitat Politècnica de Catalunya; ⁴Instituto de Geofísica, UNAM, México; ⁵Illinois Institute of Technology, Chicago, EUA.

RESUMEN

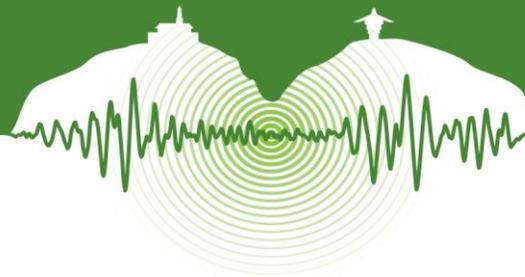
En el marco del Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction 2013, preparado por la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNISDR), se llevó a cabo, por primera vez, un estudio probabilista de peligro sísmico a nivel global, usando los mismos métodos para todo el Globo. A partir de sus resultados fue posible obtener un conjunto estocástico de escenarios para diferentes intensidades sísmicas (aceleraciones espectrales, 5% del amortiguamiento crítico), que a su vez fueron usados en un estudio de riesgo sísmico completamente probabilista. Primero, el Globo se dividió en un conjunto de áreas sismogénicas, a cada una de las cuales se asignó una magnitud máxima y un régimen tectónico predominante. Se supuso que la sismicidad de cada región quedaba correctamente definida utilizando una relación magnitud-frecuencia del tipo Gutenberg-Richter, cuyos valores a y b fueron obtenidos usando un procedimiento de sismicidad suavizada basada en el catálogo sísmico NEIC-USGS. Este catálogo fue previamente sometido a un proceso de remoción de réplicas y verificación de completitud para varios valores de magnitud umbral. A partir del régimen tectónico predominante asignado a cada región, se le asignó una relación de atenuación. Los cálculos probabilistas de peligro sísmico se llevaron a cabo con el programa CRISIS2014, el cual generó curvas convencionales de peligro sísmico para diferentes intensidades, y mapas de aceleraciones asociadas a varios periodos de retorno; adicionalmente, CRISIS generó un conjunto de escenarios estocásticos compatibles con la plataforma CAPRA. Estos escenarios fueron usados para llevar a cabo un análisis probabilista grueso de riesgo sísmico para todo el mundo.

Palabras clave: peligro y riesgo sísmicos, nivel global.

ABSTRACT

In the framework of the UNISDR's Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction 2013, for the first time, a fully probabilistic seismic hazard assessment was conducted at global level, using the same methodology for the whole Globe, from which a set of stochastic scenarios for different intensities (spectral accelerations, 5% damping) was obtained and then used in a fully probabilistic risk analysis. First, the Globe was divided into a set of seismogenic areas to which a maximum magnitude and a predominant tectonic environment type were assigned. A Gutenberg-Richter magnitude-frequency distribution was assumed for each region, with a and b-values computed using a smoothed-seismicity procedure based on the NEIC-USGS seismic catalog. This catalog was first subjected to a declustering process and completeness verification for several threshold magnitudes. Based on the tectonic environment assigned to each source, a ground motion prediction model was assigned accordingly. Probabilistic hazard computations were performed with program CRISIS2014, which generated conventional hazard curves for different intensities and maps for various return periods, as well as a set of stochastic scenarios compatible with the CAPRA platform. These scenarios, in turn, were used to perform coarse-grain probabilistic risk computations.

Keywords: Seismic hazard and risk, global level.



1 INTRODUCCIÓN

El proyecto de la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNISDR) llamado el *Global Assessment Report 2015* (GAR15) consiste en realizar una estimación a nivel global del riesgo frente a diferentes amenazas naturales; para esto se llevaron a cabo evaluaciones de estas amenazas, dentro de las cuales se incluye la amenaza sísmica, a nivel mundial de una manera probabilista. Este artículo presenta la metodología y resultados de la evaluación probabilista de la amenaza sísmica utilizada en esta nueva versión del GAR. Dado que la escala de un proyecto como el GAR15 es global, se utilizó un enfoque de resolución gruesa el cual consiste en: (1) definir provincias tectónicas generalizadas para todo el mundo; (2) asignar relaciones de atenuación individuales a cada una de estas provincias y una magnitud máxima probable de acuerdo al ambiente tectónico; y (3) aplicar la metodología de sismicidad suavizada para así obtener los diferentes parámetros de sismicidad a nivel mundial. Para esta nueva versión del GAR se han realizado actualizaciones y cambios en algunos de los insumos de entrada utilizados en la evaluación de la amenaza de la versión previa del GAR (GAR13), conservando la misma metodología de cálculo y la forma de representar la amenaza.

2 CATÁLOGO SÍSMICO

Un análisis probabilista requiere un catálogo de eventos a partir del cual se determinan los parámetros de sismicidad de cada una de las regiones sismogénicas. En este caso se utilizó el catálogo NEIC-USGS (2014) en conjunto con el catálogo del ISC-GEM (Storchak et al., 2013), a diferencia del GAR13 en donde sólo se usó el catálogo del USGS. Además de incluir el catálogo del ISC-GEM, la fecha de corte se extendió hasta del 31 de diciembre de 2013, lo que equivale a información adicional de 21 meses más.

El catálogo NEIC-USGS usado en el GAR13 se tomó como el catálogo base al cual se le adicionó el del ISC-GEM de la siguiente manera. Dado que se reconoce que los parámetros asociados al del ISC-GEM tienen mayor confiabilidad, los eventos contenidos en este fueron comparados con los del USGS (observando similitudes en las fechas y horas) y fueron reemplazados o actualizados considerando el hecho que la magnitud umbral del ISC-GEM es de 5.5 (comparada con 4.5 para USGS) y la fecha de corte es del 31 de diciembre de 2009. En consecuencia, si un evento aparece en ambos catálogos, los parámetros de localización (epicentro y profundidad) y la magnitud es actualizada con los datos del ISC-GEM, y si un evento no aparece en el del USGS, este se adiciona. En total 13.352 eventos fueron actualizados o añadidos. Por otro lado, para poder utilizar el modelo de Poisson se removieron eventos premonitorios y réplicas del catálogo, y se realizó una evaluación de la completitud del mismo siguiendo la metodología de Tinti y Mulargia (1985). Este proceso consiste en graficar el número acumulado de eventos contra el tiempo, e identificar el año a partir del cual la tasa de registro de eventos se mantiene constante. Se determinó que para la magnitud umbral seleccionada el año de corte es 1973, como se puede ver en la Fig. 1.

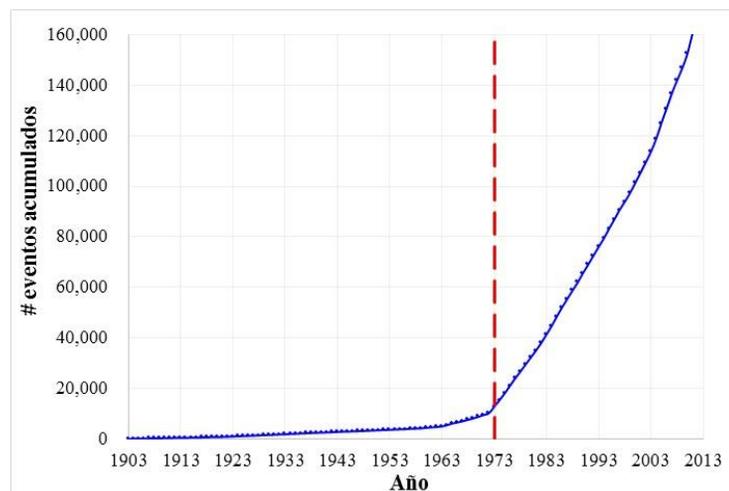


Figura 1: Completitud del catálogo sísmico.

En total el catálogo contiene 162.516 eventos; en comparación con el catálogo del GAR13, este contiene 10.966 eventos más. Cada uno de los eventos tiene la siguiente información: fecha (día, mes, año), hora, longitud, latitud, profundidad, magnitud (M_w). Las Fig. 2, 3 y 4 muestran la distribución geográfica del catálogo según la magnitud y profundidad de los eventos.

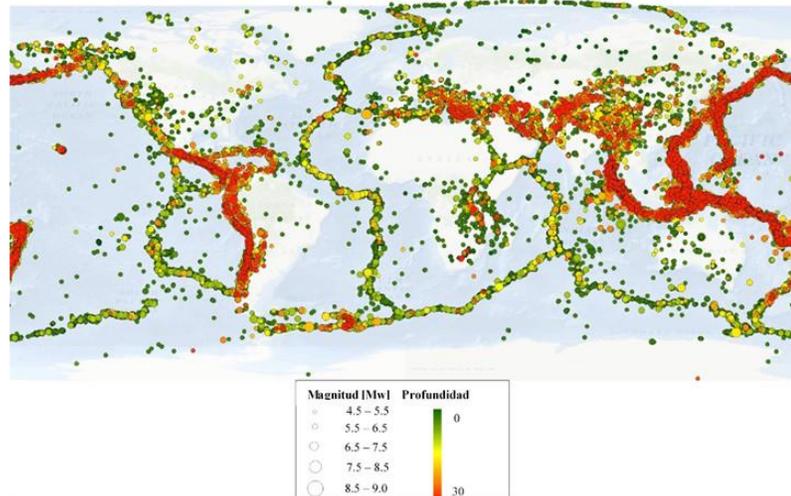


Figura 2: Epicentros de los eventos (0-30km).

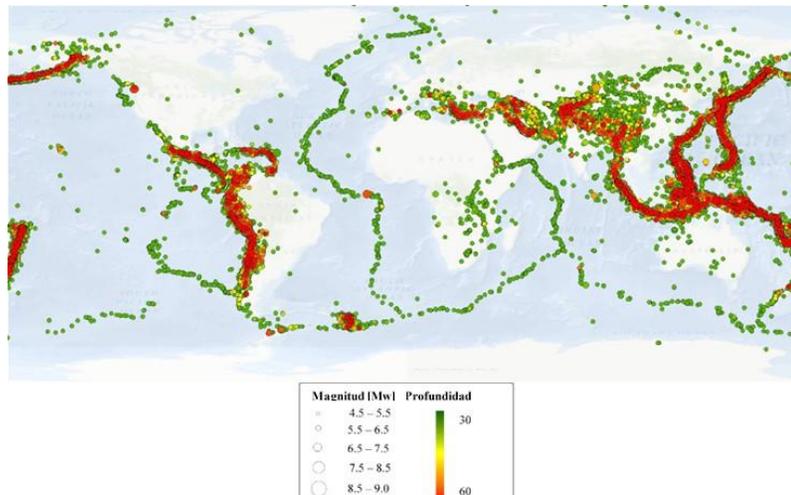


Figura 3: Epicentros de los eventos (30-60km).

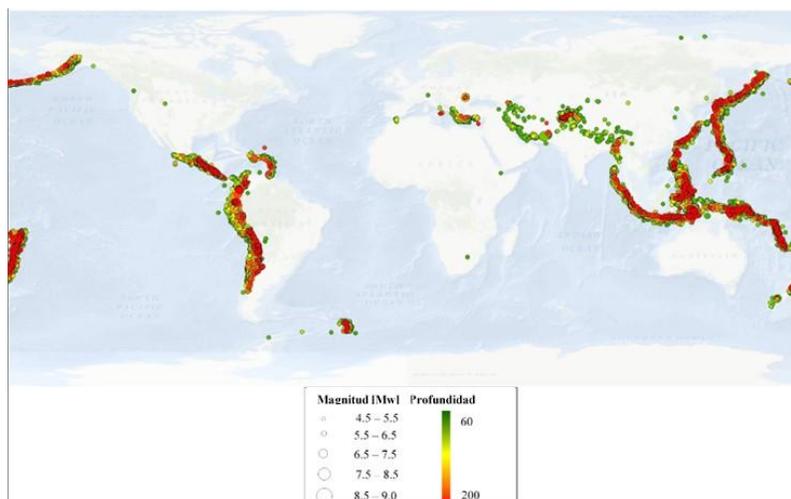
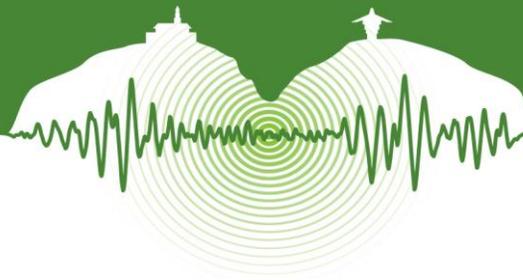


Figura 4: Epicentros de los eventos (60-200km).



3 REGIONES TECTÓNICAS

El siguiente paso en la evaluación de la amenaza es definir una serie de regiones tectónicas para todo el mundo. Esto se hace para poder asignar valores de magnitud máxima probable, M_u , y relaciones de atenuación según los diferentes ambientes sismotectónicos que se encuentran a través de toda la superficie terrestre. Esta división se realizó tomando en cuenta los límites de las placas tectónicas y el conocimiento existente acerca de la sismicidad, mecanismos focales y la existencia de fallas geológicas. En esta zonificación del planeta para el GAR15 no se hizo ningún cambio, como tampoco se cambió ningún valor de las magnitudes máximas para estas regiones con respecto al GAR13. Las provincias se definieron utilizando como base las 50 provincias propuestas por Flinn y Engdahl (1965); se debe aclarar que la zonificación final considera tanto la sismicidad causada por los bordes de placas, como la sismicidad causada al interior de las placas. A cada provincia se le asignó un valor de M_u y un rango de profundidades; asimismo, para asignar una relación de atenuación estas se clasificaron en las siguientes categorías (1) subducción interplaca, (2) subducción intraplaca, (3) cortical activa (no borde de placa), (4) continental estable, (5) cortical activa (borde de placa) y (6) *off shore*. El número total de regiones es 132, pero dado que en algunas regiones hay más de un polígono superpuesto (diferentes polígonos para diferentes rangos de profundidades), se tiene un total de 401 provincias. Para mayor detalles acerca de esta definición ver CIMNE et al., (2012). La Fig. 5 muestra el tipo de las provincias utilizadas y las Figs. 6 y 7 muestran los valores de M_u asignados.

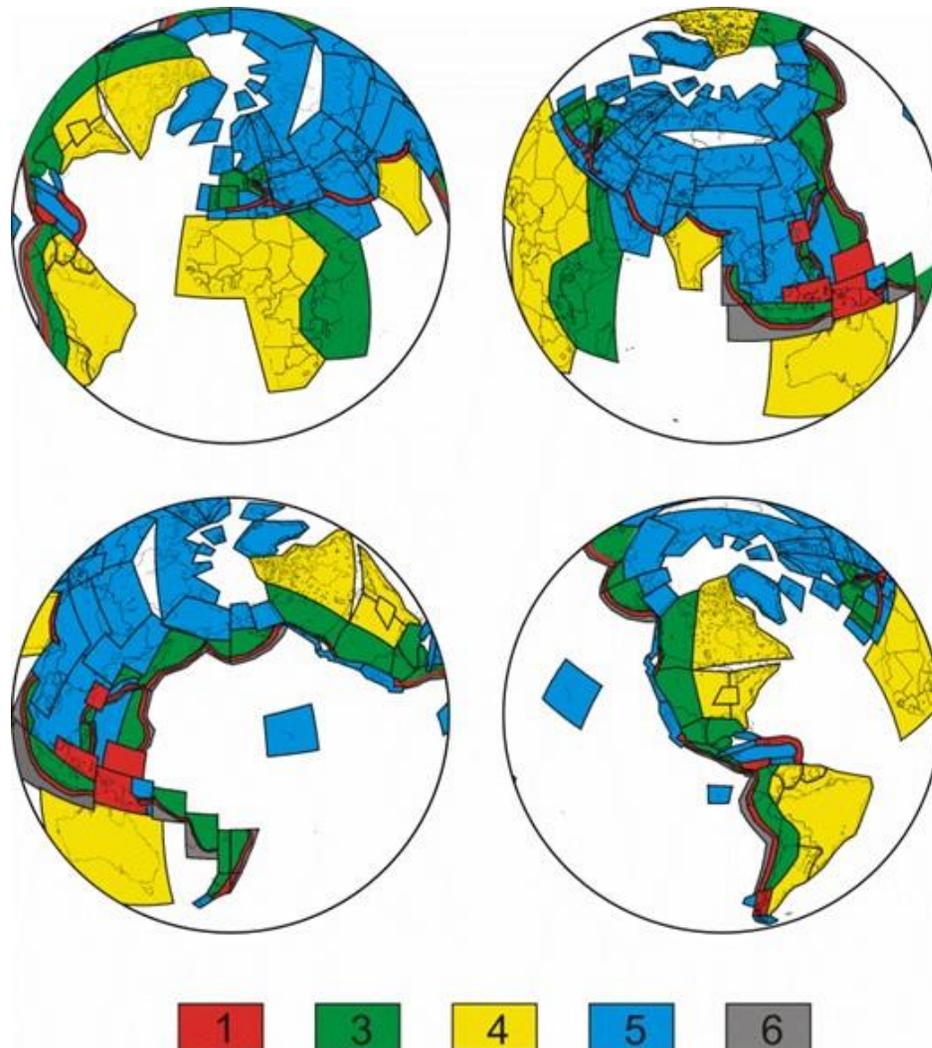


Figura 5: Provincias tectónicas utilizadas en el análisis.

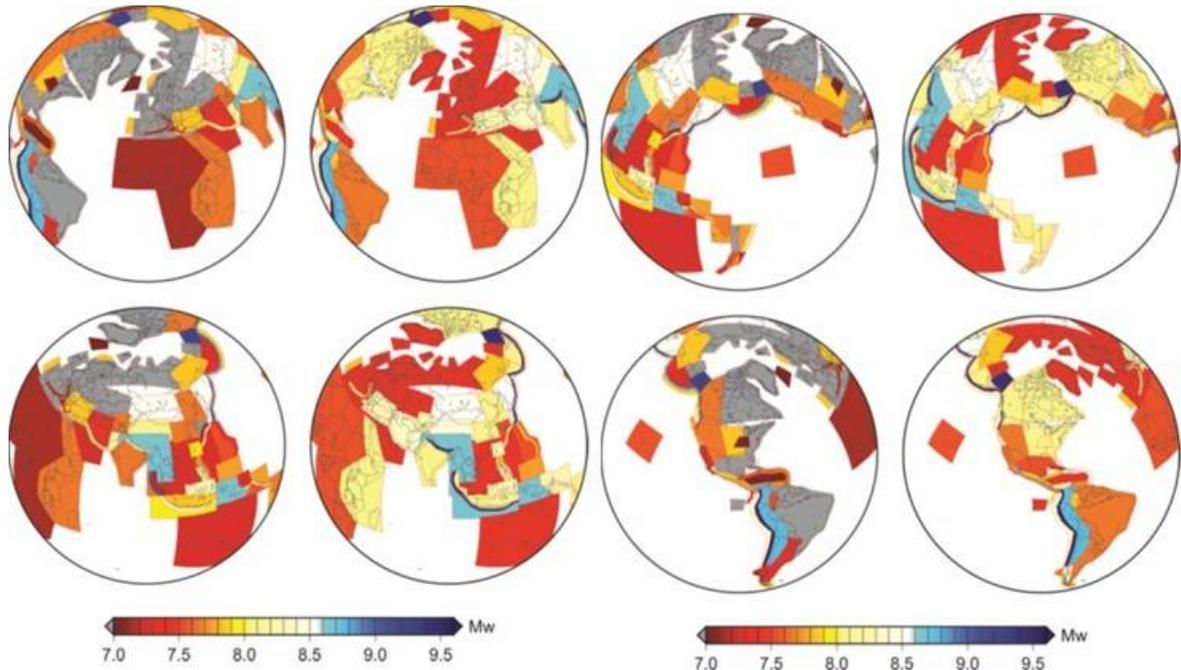


Figura 6: Mu observado (lado izquierdo de cada set) y asignado (lado derecho de cada set) para las provincias superficiales.

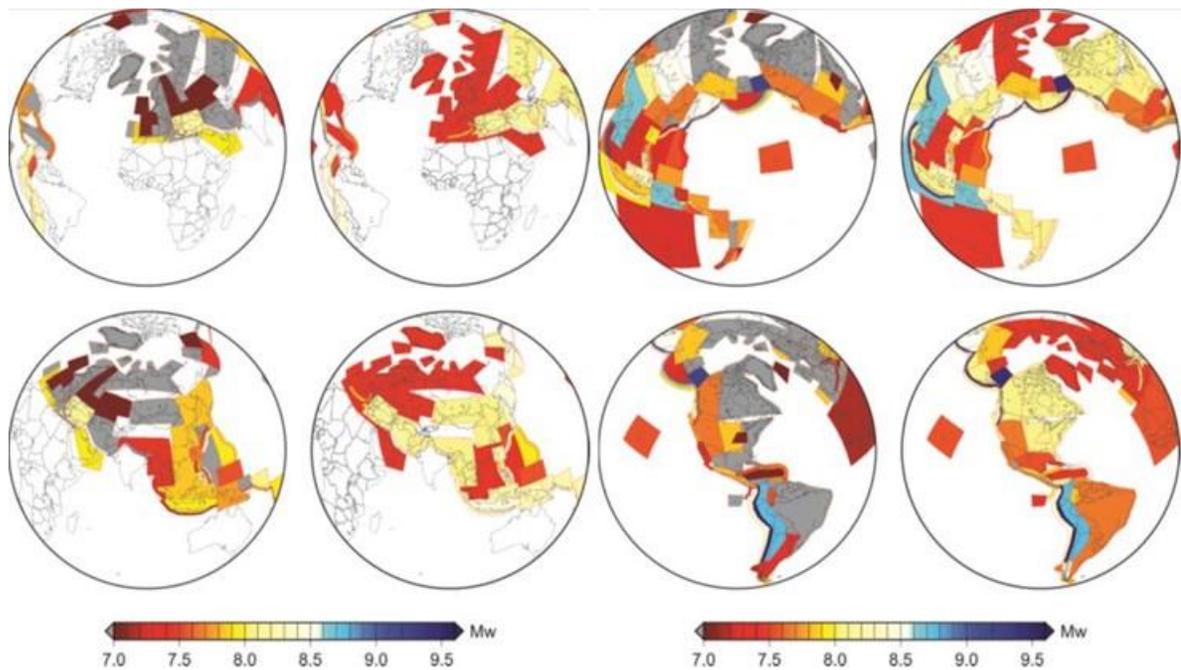
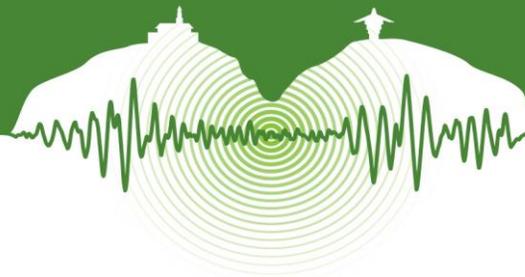


Figura 7: Mu observado (lado izquierdo de cada set) y asignado (lado derecho de cada set) para las provincias profundas.



4 MODELO DE SISMICIDAD

Para el análisis probabilista se utilizó el modelo de sismicidad de Poisson y la relación de Gutenberg y Richter (1944), más específicamente la relación de recurrencia acotada de Gutenberg-Richter (McGuire y Arabasz, 1990) expresada de la siguiente manera:

$$\lambda(M) = \lambda_0 \frac{e^{-\beta M} - e^{-\beta M_U}}{e^{-\beta M_0} - e^{-\beta M_U}} \quad (1)$$

Esta relación representa la actividad de la fuente en términos de la tasa de excedencia de magnitudes, donde M_0 es la magnitud umbral (4,5 en este caso), M_U es la magnitud máxima esperada de la fuente, λ_0 representa la tasa de actividad de la fuente sísmica y se calcula como el número de eventos de magnitud igual o mayor al valor de la magnitud umbral por año, y β representa la tasa relativa de ocurrencia de eventos de magnitud grande y pequeña, y se calcula como la pendiente de la parte inicial de la curva de recurrencia de magnitudes. Para el cálculo de estos parámetros de sismicidad se seleccionó la metodología de sismicidad suavizada; en esta metodología el mundo se divide en una malla y cada nodo representa una fuente; por lo tanto cada nodo queda caracterizado a través de tres parámetros, λ_0 , β y M_U . Dado que los sismos ocurren a diferentes profundidades, se han definido tres mallas localizadas a 15km, 45km y 75km, representando los rangos de profundidades de 0-30km, 30-60km y más de 60km respectivamente. Vale la pena notar que en los catálogos sísmicos se suele asignar una profundidad de 33km a los eventos cuya profundidad focal es difícil de calcular. Esto puede distorsionar un poco la distribución de sismos en profundidad; sin embargo, dado que la sismicidad es agrupada en rangos de profundidades, se puede considerar que este error se compensa ya que el evento no se asigna directamente a esta profundidad de 33km.

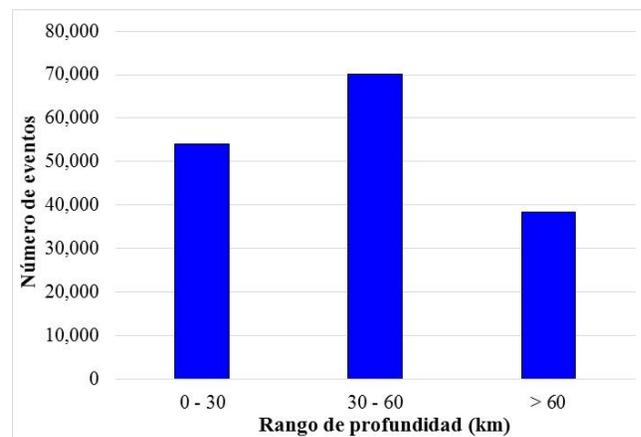


Figura 8: Número de eventos en el catálogo asociados con los tres rangos de profundidades.

Todas las mallas fueron creadas con un espaciamiento de 0.3° en ambas direcciones lo que resulta en 720.000 nodos. Se siguió el procedimiento de suavizado sugerido por Woo (1996), el cual consiste en calcular los parámetros de sismicidad usando un factor de ponderación, w , que es función de la distancia focal de un evento al nodo de la malla. Los criterios de esta ponderación y el radio de suavizado son los mismos que los usados en el GAR13: $R_{min} = 0.3^\circ$ y $R_{max} = 1.2^\circ$. El cálculo del factor de ponderación es el siguiente:

$$w = C/R_{min} \quad \text{si } R < R_{min}$$

$$w = C/R \quad \text{si } R_{min} < R < R_{max}$$

$$w = 0 \quad \text{si } R > R_{max}$$

donde R es la distancia entre el foco del evento y el nodo en la malla que se está caracterizando y C es una constante arbitraria. Adicionalmente, para evitar errores en la caracterización debido a poca cantidad de eventos disponibles (que se refleja en el valor de β), el parámetro β se trunca a valores entre 1.8 y 3. La Fig. 9 muestra las mallas de λ_0 y el valor esperado de β (ya que β no se conoce con certeza se determina el valor esperado y el coeficiente de variación) para el rango de profundidad de 0-30km a modo de ejemplo.

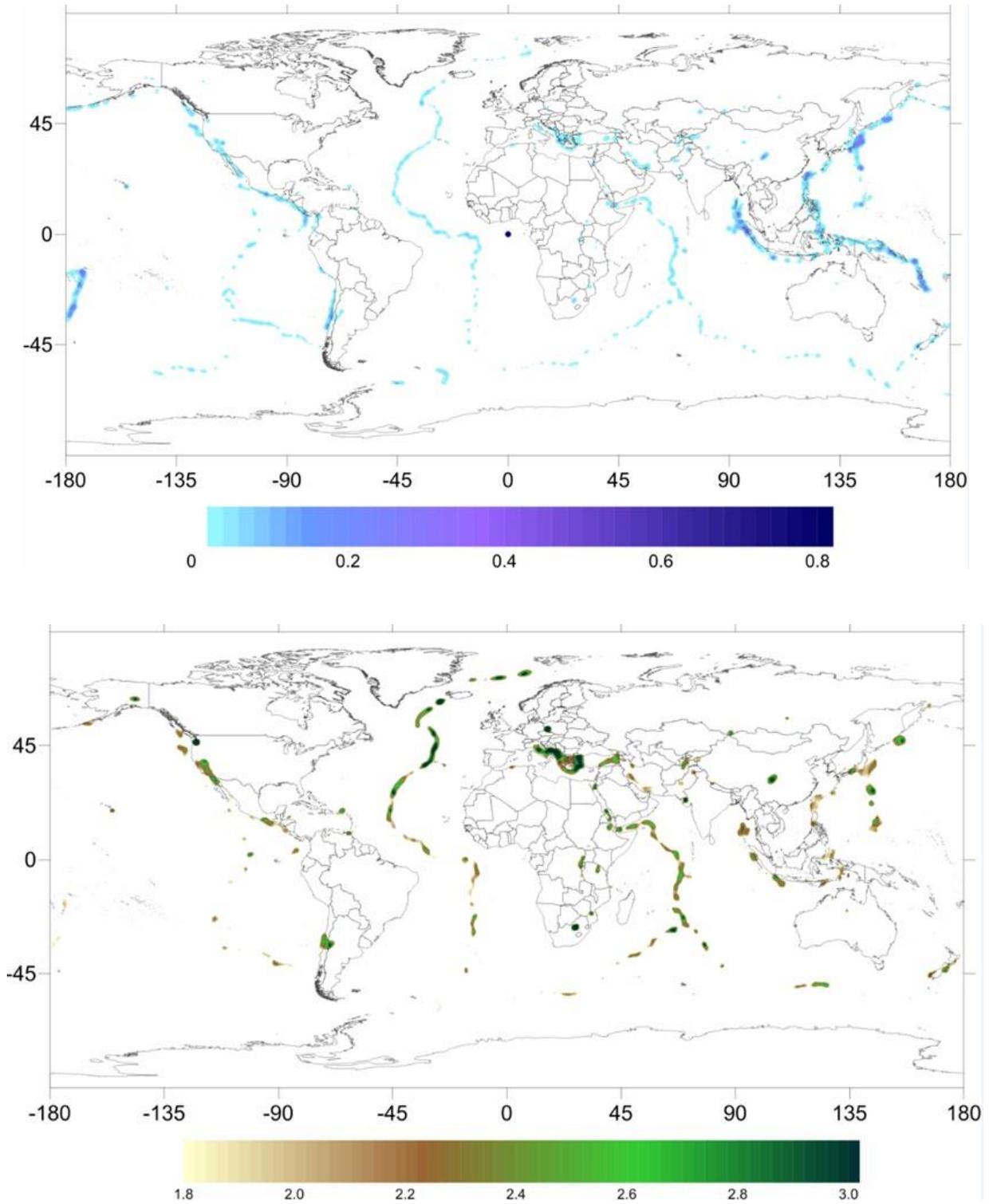
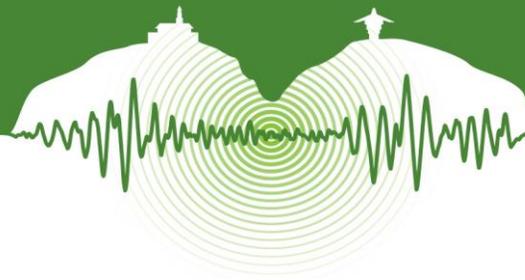
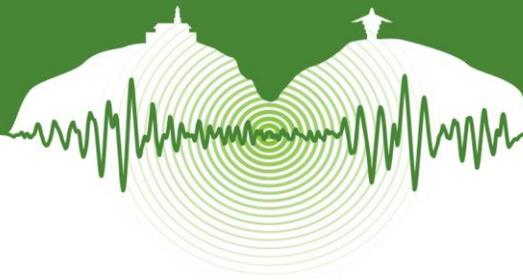


Figura 9: λ_0 (arriba) y valor esperado de β (abajo) para 0-30km.



5 RELACIONES DE ATENUACIÓN

Las relaciones de atenuación son ecuaciones que describen cómo varía la intensidad con la distancia y la magnitud del evento. Para el GAR15 se efectuaron varias modificaciones con respecto a las relaciones utilizadas en el GAR13: se asignó una relación única a cada tipo de ambiente tectónico según Stewart et al. (2013). Las relaciones usadas son las siguientes:

- Zhao et al. (2006) Interface – para subducción interplaca
- Zhao et al. (2006) Intraslab – para subducción intraplaca
- Atkinson y Boore (2006) – para continental estable
- Cauzzi y Faccioli (2008) – para cortical activa (no borde de placa) y *off shore*
- Chiou y Youngs (2008) – para cortical activa (borde de placa)

Las ecuaciones para subducción interplaca, subducción intraplaca y cortical activa han sido cambiadas con respecto a las usadas en el GAR13. Todas estas relaciones incluyen un amplio rango de ordenadas espectrales lo que permite el cálculo del riesgo probabilista de forma adecuada. Adicionalmente, en la definición de parámetros para todas las relaciones se definió explícitamente un valor de V_{s30} igual a 1.100 m/s para así garantizar consistencia para todo el mundo.

6 EVALUACIÓN DE LA AMENAZA SÍSMICA

La evaluación de la amenaza se llevó a cabo para cada uno de los nodos que conforman la malla que cubre todo el globo, calculando las tasas de excedencia de aceleración para cada ordenada espectral considerada en el análisis, siguiendo la metodología descrita en CIMNE et al (2012). Para esto se utilizó el programa CRISIS 2014 (Ordaz et al., 2014) el cual es compatible con la plataforma CAPRA. Utilizando las mallas de sismicidad que contienen los parámetros λ_0 , β y M_U se generan escenarios en cada nodo para diferentes magnitudes y frecuencias de ocurrencia. En total se obtuvo un total de 1.022.129 escenarios, cada uno con las intensidades esperadas y desviación estándar para las 23 ordenadas espectrales, y una frecuencia anual de ocurrencia. El conjunto resultante de escenarios estocásticos se almacena en un archivo con extensión *.AME el cual es utilizado posteriormente para el cálculo de riesgo probabilista. Para calcular las tasas de excedencia de intensidad se consideran los efectos de totalidad de los nodos de las mallas de los parámetros a las tres profundidades y la distancia correspondiente al nodo de interés en la malla de cálculo, usando la siguiente ecuación:

$$\nu(a) = \sum_{n=1}^N \int_{M_0}^{M_U} -\frac{\partial \lambda}{\partial M} \Pr(A > a | M, R_i) dM \quad (2)$$

donde la suma cubre la totalidad de los N nodos localizados dentro de la distancia de integración (300km), $\Pr(A > a | M, R)$ es la probabilidad de que la intensidad exceda cierto valor dada determinada magnitud M y distancia R entre la fuente y el punto de análisis y $\lambda(M)$ es la función de tasa de excedencia de magnitudes. La integración se hace entre M_0 y M_U , considerando así todas las posibles magnitudes en cada nodo. Asumiendo que la intensidad sigue una distribución lognormal, la probabilidad $\Pr(A > a | M, R)$ se calcula de la siguiente manera:

$$\Pr(A > a | M, R_i) = \Phi \left(\frac{1}{\sigma \ln a} \ln \frac{MED(A | M, R_i)}{a} \right) \quad (3)$$

donde $\Phi(\cdot)$ es la función de distribución normal estándar, $MED(A | M, R)$ es la mediana de la intensidad dada por la relación de atenuación para cierta magnitud y distancia, y σ es la desviación estándar del logaritmo natural de la intensidad. Al realizar esta integración se obtienen mapas de amenaza uniforme, que suele ser la forma tradicional de representar la amenaza. Se obtuvieron mapas de aceleración espectral para ordenadas espectrales de 0s, 0.2s, 0.5s, 1s, 2s, y para periodos de retorno de 225, 475, 1000 y 2500 años. Es importante resaltar que los resultados están a nivel de roca ($V_{s30}=1.100\text{m/s}$), ya que no se han considerado efectos locales de suelo ni de topografía, lo que en algunas ciudades del mundo es muy importante. La Fig. 10 muestra dos mapas de amenaza: (1) para PGA y 475 años y (2) para 0.2s y 2500 años. La Fig. 11 muestra las curvas de amenaza para PGA y espectros de amenaza uniforme para 475 años para varias ciudades del mundo.

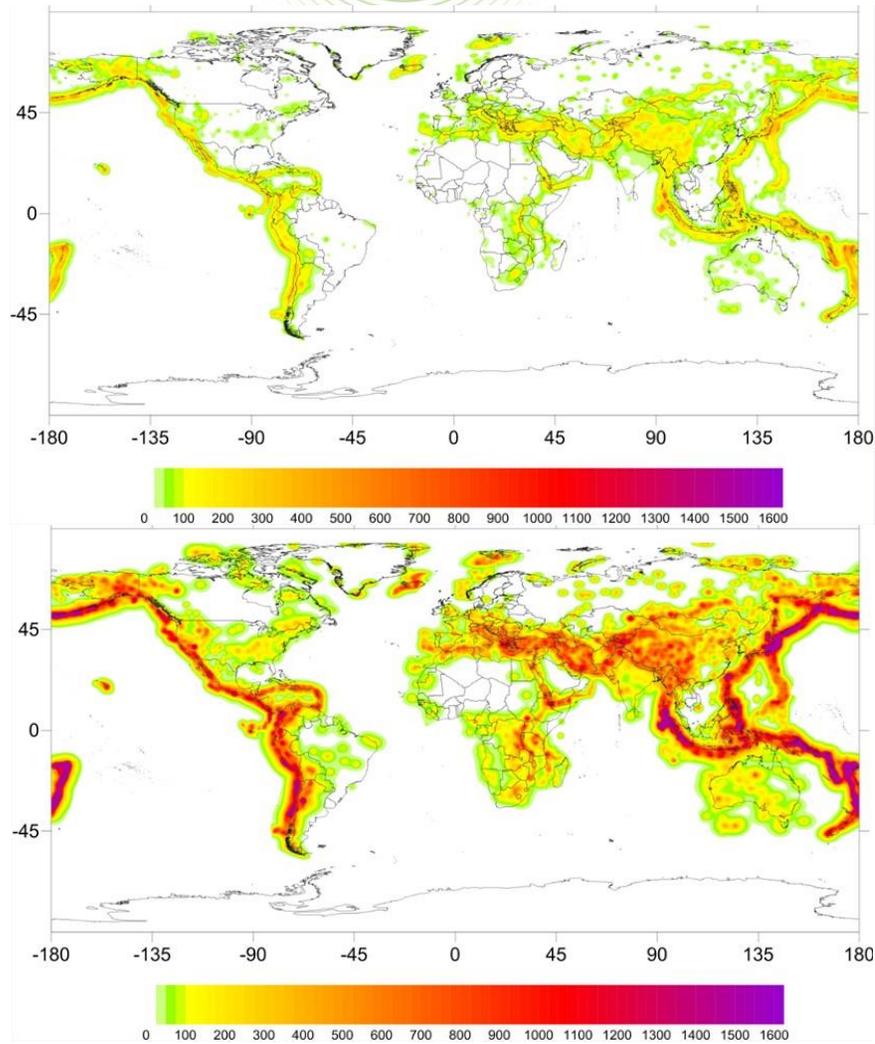


Figura 10: Aceleración el gal para PGA y 475 años de periodo de retorno (arriba) y 0.2s y 2500 años de periodo de retorno (abajo)

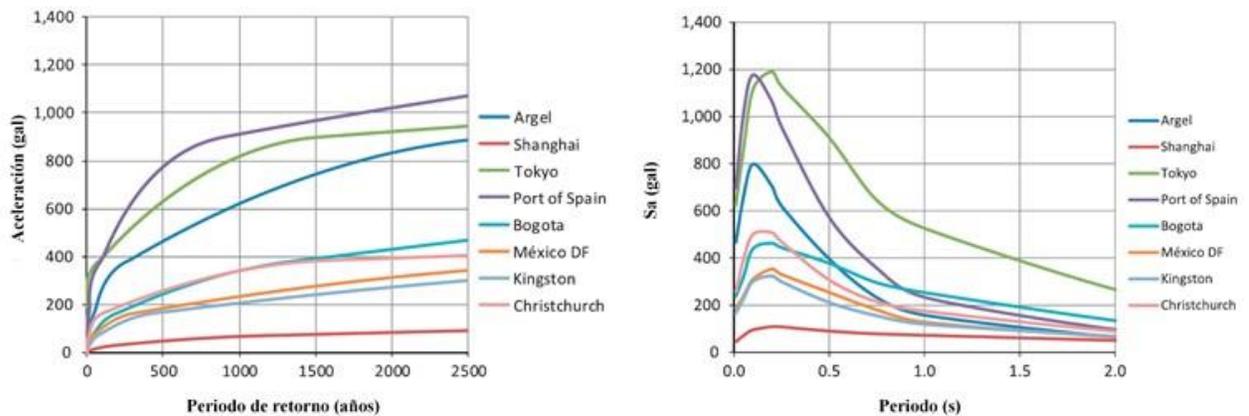
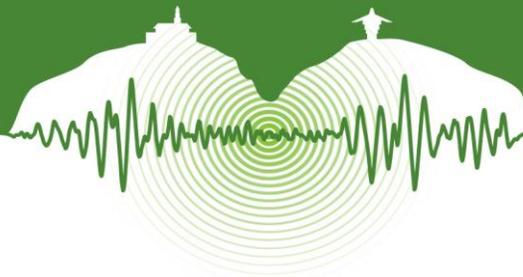


Figura 11: Curva de amenaza (izquierda) y espectro de amenaza uniforme para varias ciudades (derecha).



7 CONCLUSIONES

Se llevó a cabo un análisis probabilista de amenaza sísmica a nivel global utilizando una única metodología. Dada la gran escala del análisis se consideró que no era práctico ni adecuado definir un set extenso de fallas o fuentes sismogénicas de área, y en su lugar se eligió tomar un enfoque de sismicidad suavizada. Ya que se usaron relaciones de atenuación espectrales, los resultados de amenaza se obtuvieron en términos de tasas de excedencia para diferentes ordenadas espectrales, a partir de las cuales se derivan los espectros de amenaza uniforme. Además de esto, se generó un set de sismos estocásticos (compuesto por más de 1 millón de escenarios) que contienen intensidades asociadas a 23 ordenadas espectrales y que cubren todo el globo. Estos escenarios fueron utilizados posteriormente en la evaluación probabilista de riesgo sísmico a nivel mundial que hace parte del proyecto GAR15, en cual se obtuvieron resultados de riesgo a nivel de país a través de las métricas de pérdida anual esperada (PAE), curva de excedencia de pérdidas y pérdidas máximas probables para diferentes periodos de retorno (PMP's).

REFERENCIAS

- Atkinson, G. and Boore, D. 2006. Earthquake Ground-Motion Prediction Equations for Eastern North America. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 96.
- Cauzzi, C. and Faccioli, E. 2008. Broadband (0.05 to 20s) prediction of displacement response spectra based on worldwide digital records. *Journal of Seismology*, Vol 12, N° 4.
- Chiou, B. and Youngs, R. 2008. An NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra. *Earthquake Spectra*, Vol 24, N°1, pp. 173-215.
- CIMNE, ITEC S.A.S., INGENIAR LTDA. and EAI S.A. 2012. *Probabilistic modelling of natural risks at the global level: Global Risk Model*. Background paper for the GAR13.
- Flinn, E.A. and Engdahl, E.R. 1965. A proposed basis for geographical and seismic regionalization. *Reviews of Geophysics*, Vol 3, pp. 123-149.
- Gutenberg, R. and Richter, C.F. 1944. Frequency of earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America* Vol 34, pp. 185-188.
- McGuire, R.K. and Arabasz, W.J. 1990. An introduction to probabilistic seismic hazard analysis. In S.H. Ward (Ed.), *Geotechnical and Environmental Geophysics*, Vol 3, pp. 333-353.
- NEIC-USGS. 2014. Earthquake catalogue search. United States Geological Survey.
- Ordaz, M., Martinelli, F., Aguilar, A., Arboleda, J., Meletti, C., and D'Amico, V. 2014. CRISIS 2014 V1.2. Program for computing seismic hazard. Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Storchak, D.A., Di Giacomo, I., Bondár, E. R., Engdahl, J., Harris, W.H.K., Lee, A., and Villaseñor y Bormann, P. 2013. *Public Release of the ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900- 2009)*. Seismological Research Letters.
- Tinti, S. and Mulargia, F. 1985. An improved method for the analysis of the completeness of a seismic catalogue. *Lettere Al Nuovo Cimento Series 2*.
- Woo, G. 1996. Kernel Estimation Methods for Seismic Hazard Area Source Modeling. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol 68, N° 2, pp. 353-362.
- Zhao, J. X., Zhang, J., Asano, A., Ohno, Y., Oouchi, T., Takahashi, T., Ogawa, H., Irikura, K., Thio, H.K., Somerville, P.G., and Fukushima, Y. 2006. Attenuation relations of strong ground motion in Japan using site classification based on predominant period. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol 96, N° 3, pp. 898-913.