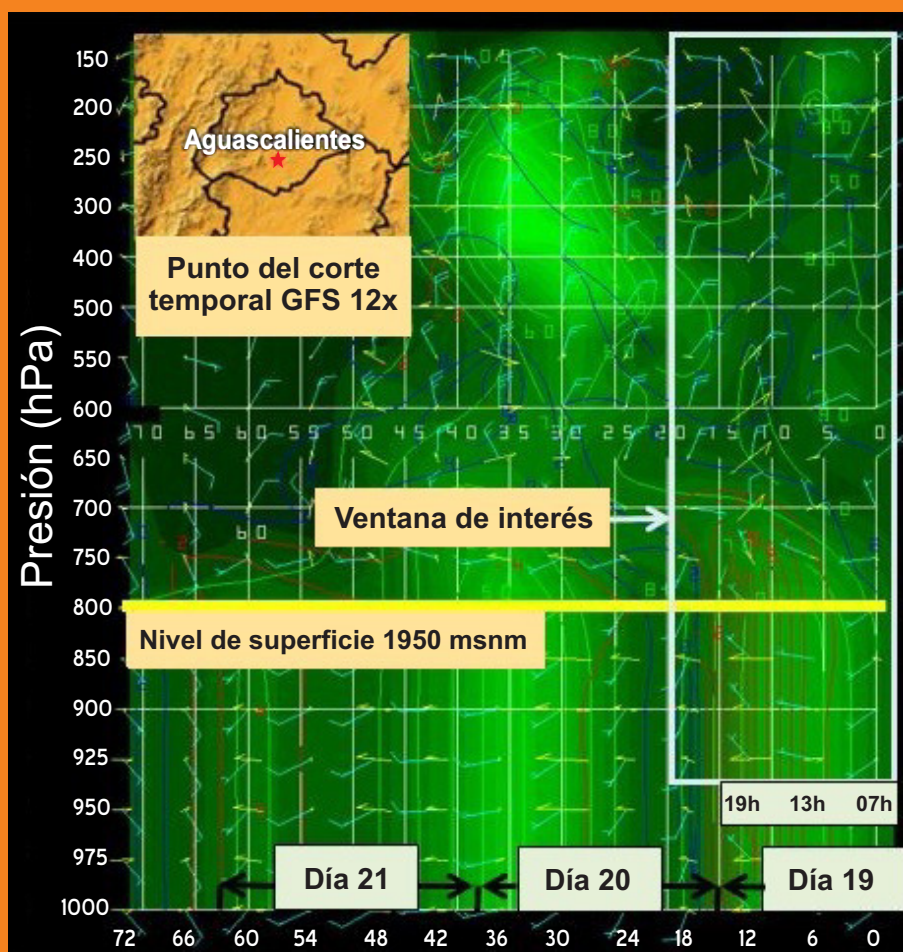


geos



GEOS se publica dos veces al año patrocinada por el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) y editada conjuntamente por la UGM y el CICESE.

UNIÓN GEOFÍSICA MEXICANA, A.C. Mesa Directiva 2020-2021

Dra. Vanessa Magar Brunner
División de Oceanología, CICESE
Presidenta

Dr. Arturo Iglesias Mendoza
Instituto de Geofísica, UNAM
Vicepresidente

Dr. Mario González Escobar
División de Ciencias de la Tierra, CICESE
Tesorero

Dr. Héctor González Huizar
División de Ciencias de la Tierra, CICESE
Secretario General

Dr. Markus Gross
División de Oceanología, CICESE
Secretario de Investigación

Dra. Ruth Cerezo Mota
Instituto de Ingeniería, Unidad Sisal, UNAM
Secretaría de Difusión

Dra. Ericka Alinne Solano
Universidad del Mar, Puerto Ángel, Oaxaca
Secretaria de Educación

Dr. Luis Alonso Gallardo Delgado
División de Ciencias de la Tierra, CICESE
Secretario de Vinculación

Editores Principales

Luis A. Delgado Argote
ldelgado@cicese.mx
CICESE

Ruth Cerezo Mota
rcerezom@ingen.unam.mx
UNAM

Comité Editorial

Harald Böhnelt, UNAM
Noel Carbajal Pérez, IPICYT
Oscar Campos, UNAM
Gerardo Carrasco, UNAM
Ana Luisa Carreño, UNAM
Carlos Flores Luna, CICESE
Juan García Abdeslem, CICESE
René Garduño, UNAM
Gustavo Tolson, UNAM
Felipe Escalona, UAZ

Apoyo Técnico Editorial

Humberto S. Benítez Pérez
Angel Daniel Peralta Castro
Sergio Manuel Arregui Ojeda
María Cristina Álvarez Astorga

GEOS, boletín informativo de la Unión Geofísica Mexicana (UGM), se edita conjuntamente por la UGM y el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE) bajo el patrocinio del CICESE. Se publica dos veces al año, contiene artículos originales, artículos de divulgación, notas cortas, aspectos relevantes para la difusión de la actividad científica, tecnológica y docente en las Ciencias de la Tierra, así como noticias de interés para los miembros de la UGM. Las instrucciones para los autores se encuentran al final de cada número y en <http://www.ugm.org.mx/geos.html>

GEOS (ISSN 0186-1891) se edita en la División de Ciencias de la Tierra, CICESE, Carretera Ensenada-Tijuana No. 3918, Zona Playitas 22860, Ensenada B.C., México.

Dirigir toda correspondencia a:
Editorial GEOS
División de Ciencias de la Tierra, CICESE
ldelgado@cicese.mx
Tel. en Ensenada B.C.: (646)175-0500, Ext. 26060

Título: GEOS

Periodicidad: semestral

ISSN: 0186-1891

Editado en la División de Ciencias de la Tierra, CICESE, Carret. Ensenada-Tijuana No. 3918, Zona Playitas 22860, Ensenada B.C., México.

EDITORIAL

La energía y el agua en el sistema Tierra	... 185
--	---------

ARTÍCULOS

Catálogo de terremotos de América del Sur homogéneo en Mw para el periodo pre-1964	... 187
---	---------

A.A. Gómez-Capera, M. Stucchi, L. Rodríguez, M. Arcila, M. Bufaliza, J. Choy, E. Minaya, L. Leyton, M. Pirchiner, H. Rendón, A. Sarabia, H. Tavera, H. Yepes

Características de las principales áreas sísmicas de Cuba	... 227
--	---------

Mario Octavio Cotilla Rodríguez, Diego Córdoba Barba, Leonardo Álvarez Gómez

NOTA

Detección de una tormenta severa ocurrida en Aguascalientes, para la aplicación en el pronóstico meteorológico mediante datos de GFS	... 243
---	---------

Maria Elena Bravo, María Virginia Mezo

COMUNICACIONES

POLÍTICA EDITORIAL	... 257
---------------------------	---------

La energía y el agua en el sistema Tierra

Las heladas de principios de 2021 en EUA pusieron en serios aprietos a la sociedad norteamericana por la falta de energía eléctrica y agua. La estrecha dependencia entre México y EUA en temas de aprovisionamiento de combustibles fósiles para el manejo de las termoeléctricas también se reflejó, no sólo en la necesidad de energía, sino en costo económico. Entre las lecciones de ese evento de origen meteorológico está la evidente fragilidad de la sociedad ante tales fenómenos, así como los riesgos de dejar en manos del libre mercado la generación y administración de la energía eléctrica, principalmente. Dichas lecciones se refuerzan además desde la perspectiva económica pues, para que el modelo de negocio resulte más sustancioso, es necesario contar con un subsidio importante. En nuestro país, un ejemplo de ello es el contrato por medio del cual la empresa petrolera del Estado mexicano debía proveer gas etano a una particular por 20 años a un precio 30 por ciento inferior al valor de mercado. Esta situación es doblemente grave si consideramos el abandono de las hidroeléctricas del mismo Estado, las cuales garantizan con mucha mayor certidumbre el suministro de energía limpia y sin intermitencias.

Es cierto que fenómenos meteorológicos como el de principios de año son eventuales, aunque no podemos aún decir si serán más frecuentes. También es cierto que otras fuentes de energía más limpias que las que usan combustóleos son las que aprovechan la energía solar y la eólica. Sin embargo, el aprovechamiento de dichas energías tiene el inconveniente de que las plantas solares requieren de sol y los campos eólicos requieren viento, por lo que su capacidad de generación de electricidad es intermitente, mientras que la necesidad siempre es continua. Para mantener saludable el mercado energético es necesario entonces que cuando la radiación solar sea intensa y los vientos sean convenientes, haya que aprovecharlos al máximo desconectando los sistemas hidroeléctricos del Estado para evitar sobrecarga. Huelga decir que al menguar la irradiación o el flujo eólico las plantas requieren del respaldo de plantas de combustóleo o gas que recae en el mismo Estado. Parecería obvio mencionar que los requerimientos de energía abundante y continua están orientados principalmente para la planta industrial de gran calado, y entonces podemos mencionar que los mayores beneficios de la energía solar y eólica, en un país como el nuestro, deberían ser muy factibles para las numerosas ciudades pequeñas y comunidades aisladas que tienen industria doméstica.

Con respecto al agua, una situación que parece invariable cada primer cuatrimestre de año es su carestía y entonces, el tema sobre el aprovechamiento, el desperdicio y mal manejo del recurso hídrico se retoma en periodos anuales. Como el caso del pago de impuestos, cuya carga y beneficios son selectivos, las cuotas de agua también siguen

ese patrón. Cuando escasea el líquido, la población y la industria tienen un trato diferenciado pues la sed se puede apagar con refrescos y cervezas, cuya producción no se contempla que se detenga. El desbalance en el manejo de los acuíferos mapea la concentración de ciertas industrias, algunas de ellas, ubicadas en regiones con recarga limitada, sin mencionar los problemas que generan por contaminación.

Lo último nos lleva irremediabilmente al tema de salud que tanta atención acapara desde el inicio de la pandemia actual. En este tema que involucra el bienestar social, convergen la distribución y accesos a los servicios y bienes en su conjunto, pasando desde los médicos, hasta los más elementales como el agua y los alimentos. Por la dura prueba del confinamiento y el distanciamiento social hay sectores en los que los daños son muy profundos, como en el de la educación y otros en los que, a pesar de la gravedad, parecen ser pasajeros, como el automotriz. En estos momentos es urgente replantear el papel que los sistemas de investigación públicos deben tener para analizar, entender y ofrecer posibles soluciones a este tipo de emergencias. Ahora es cuando la integración de los conocimientos sobre los sistemas geológico, atmosférico, de la hidrósfera y la biósfera deben garantizar la sobrevivencia sana, y lo más equilibrada posible, a la vida en este planeta el cual, habrá que decirlo de nuevo, es el único que tenemos.

Catálogo de terremotos de América del Sur homogéneo en Mw para el periodo pre-1964

A.A. Gómez-Capera¹, M. Stucchi², L. Rodríguez³, M. Arcila⁴, M. Bufaliza⁵, J. Choy⁶, E. Minaya⁷,
L. Leyton⁸, M. Pirchiner⁹, H. Rendón¹⁰, A. Sarabia⁴, H. Tavera¹¹, H. Yepes¹²

¹Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, sezione di Milano, Italia

²Eucentre, Pavía, Italia

³Centro Regional de Sismología para América del Sur-CERESIS, Lima, Perú.

⁴Servicio Geológico Colombiano, Bogotá, Colombia

⁵Instituto Nacional de Prevención Sísmica, San Juan, Argentina

⁶Universidad de los Andes, Facultad de Ciencias, Laboratorio de Geofísica, Mérida-Venezuela.

⁷Observatorio de San Calixto, La Paz, Bolivia

⁸Universidad de Chile, Santiago, Chile

⁹Universidade de São Paulo, Brasil

¹⁰FUNVISIS, Caracas, Venezuela

¹¹Instituto Geofísico del Perú, Lima, Perú

¹²Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador

*aagomezcaper@gmail.com

Resumen

En el marco del proyecto *The South América Risk Assessment* (SARA), se compiló un catálogo de terremotos para América del Sur, en términos de magnitud momento (M_w), a partir de los datos disponibles en el Centro Regional de Sismología para América del Sur (CERESIS), tanto de los estudios recientes de terremotos históricos, como de los análisis realizados durante el proyecto. En particular, se incluyen: i) la última versión del catálogo CERESIS-91 preparado por CERESIS y publicado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONCYTEC del Perú; ii) la determinación de parámetros por parte de estudios recientes, incluidos los propuestos por el catálogo ISC-GEM y, en su caso, los catálogos nacionales que cumplen con los criterios de transparencia requeridos por el proyecto. Los resultados descritos en el presente artículo se refieren a la ventana de tiempo pre-1964.

La primera parte del trabajo corresponde al desarrollo de un inventario crítico de todos los estudios públicos relacionados con los terremotos de América del Sur. Los diferentes estudios para el mismo terremoto son asociados entre sí a partir de la comparación del tiempo, de las coordenadas del epicentro y del tamaño (magnitud o intensidad macrosísmica máxima) del terremoto. Para cada evento, se selecciona de manera preliminar un conjunto de parámetros considerados confiables.

El principal problema de un catálogo de parámetros de terremotos es la necesidad de expresar los valores del tamaño del sismo de manera homogénea en términos de magnitud momento (M_w). Actualmente, en la región son pocos los estudios, (en particular sobre terremotos históricos) que proporcionan ese valor. En la mayoría de los casos, debido al tiempo de ocurrencia de estos eventos, que corresponde al periodo pre-instrumental; los valores de magnitud se calcularon a partir de datos macrosísmicos. A lo largo del continente sudamericano muchos terremotos tienen disponibles la información del tamaño en términos de magnitud de onda superficial M_s y magnitud de onda volumétrica m_b . Para dichos eventos, en el presente estudio se utilizan relaciones empíricas de conversión entre M_w , M_s y m_b , publicadas en la literatura. También hay terremotos para los que sólo está disponible la información macrosísmica, por lo cual, usando relaciones empíricas, la M_w es calculada a partir de la intensidad macrosísmica máxima (I_{max}). Dichas relaciones son de carácter regional y son calibradas en este estudio utilizando terremotos post-1900.

La segunda parte de trabajo corresponde a la compilación y evaluación de parámetros del terremoto (localización, Mw e incertidumbres) a partir de la distribución de datos de intensidad macrosísmica, para eventos históricos de los valles andinos del norte de América del Sur. En particular, una relación de atenuación de la intensidad macrosísmica se calibró en término de Mw para el territorio colombiano y se aplicó para evaluar parámetros a partir del método de Bakun y Wentworth (1997) y usando datos macrosísmicos dados por la literatura. Para los casos de eventos históricos en Ecuador y Venezuela, son adoptados los resultados de parámetros de estudios recientes donde se aplica dicho método.

De esta manera, se evaluó la magnitud Mw para 2564 terremotos de América del Sur. El umbral inferior es definido en Mw=5 para la región andina. Para Brasil no se aplicó un umbral más bajo.

Palabras clave: Catálogos, terremotos, América del Sur.

Abstract

Under the framework of The South America Risk Assessment (SARA) project, an earthquake catalogue was compiled for South America in terms of the moment magnitude (Mw), with data from the *Centro Regional de Sismología para América del Sur* (CERESIS), recent national and international studies, and from the analysis conducted during the project. In particular, it is included the latest versions of the catalogue CERESIS-91 prepared by CERESIS and published by the National Council of Science and Technology CONCYTEC of Peru, the determination of parameters by recent studies, including those proposed by the ISC-GEM catalogue. Also, when they were available, the national catalogues that meet the criteria of transparency required by the project. The results presented in this work correspond to the pre-1964 time window.

The first phase of the study is the development of a critical inventory of all public studies related to earthquakes in South America. Studies for the same event have been associated with each other from the comparison of the time, the epicentre coordinates and the size of the earthquake (magnitude or maximum seismic intensity). For each event, a set of parameters considered reliable were been preliminarily selected. The main problem of the catalogue is the necessity to express the values of magnitude in terms of moment magnitude (Mw). Currently, few studies on historical earthquakes provide this value for the study region. For many events, values in terms of M_s and m_b are available; although for most cases, because of the time of occurrence of these events, the magnitude values were calculated from macroseismic data. For these earthquakes we have used empirical conversion relationships published in the literature for M_s and m_b to Mw.

There are also events for which only a value of maximum intensity (I_{max} or I_0) is available. For these events, regional relationships I_{max} to Mw were been determined, using the most reliable and recent data of Mw and I_{max} values.

In a second phase, for some events having a sufficient number of macroseismic data, the source parameters (including location, Mw and uncertainties) were determined using the method of Bakun and Wentworth (1997), regionally calibrated, based on what already has been obtained for Ecuador, Venezuela the literature, and Colombia in this project.

In this way, the magnitude Mw was evaluated for 2564 earthquakes in South America. The lower threshold is defined in Mw = 5 for the Andean region. For Brazil, a lower threshold was not applied.

Keywords: earthquakes; catalogue; South America.

1. Introducción

El continente sudamericano tiene una larga tradición de investigación sobre terremotos históricos (Giesecke et al., 2004). El Centro Regional de Sismología para América del Sur (CERESIS) publicó el primer catálogo de terremotos a escala continental en 1985. En dicho catálogo, para muchos eventos históricos y aquellos localizados en áreas escasamente monitoreadas, los parámetros de terremotos fueron calculados a partir de la primera base de datos de intensidades macrosísmicas publicada a nivel internacional por CERESIS (1985). La investigación de carácter histórico y macrosísmico continúa su desarrollo a escala nacional por las diferentes instituciones sismológicas de los países de América del Sur, principalmente con referencia a grandes terremotos, ya sean históricos o recientes.

El proyecto SARA (*South America Risk Assessment*) se realizó en el bienio 2013-2015, y fue un programa regional promovido por iniciativa de la Fundación “Global Earthquake Model” (GEM; www.globalquakemodel.org). SARA tuvo como objetivo evaluar la amenaza y el riesgo sísmico, estimar la combinación de factores sociales y económicos que aumentan los daños físicos y disminuyen las capacidades post-evento de las poblaciones para responder y recuperarse de los efectos causados por la ocurrencia de terremotos en América del Sur (<https://sara.openquake.org/>), involucrando a expertos locales de la región.

El presente artículo presenta la metodología aplicada para la compilación del catálogo de parámetros de terremotos de América del Sur para el periodo pre-1964, que corresponde principalmente a la componente histórica del catálogo de terremotos que se desarrolló en el marco del módulo de amenaza sísmica del proyecto SARA (<https://sara.openquake.org/>). La metodología sigue los objetivos trazados por

dicho proyecto:

- que la compilación del nuevo catálogo de terremotos, para América del Sur, sea homogénea en lo posible, en términos de magnitud M_w ;
- que sea aplicada la experiencia adquirida a través de los métodos, implementaciones y productos publicados por GEM, como por ejemplo, el catálogo de terremotos de carácter instrumental ISC-GEM (2015) y el catálogo histórico de carácter global para $M_w \geq 7$ (Global Earthquake History, GEH, 2013).

En este estudio, el material público disponible en la región también se consideró en la compilación; dicho material se agrupó de la siguiente forma:

- estudios de terremotos con información de parámetros del sismo, es decir, fecha y tiempo, magnitud, localización, profundidad focal e incertidumbres;
- estudios de terremotos con información de datos de intensidad macrosísmica;
- catálogos paramétricos nacionales e internacionales que están disponibles, entre otros, en el CERESIS, en la literatura y en las agencias nacionales que estudian y gestionan el ámbito sismológico de los países de América del Sur.

A partir del material público considerado se realizó un inventario crítico y un análisis de dicho material durante todo el proyecto. Las entradas relacionadas al mismo terremoto se agruparon, lo cual permitió detectar y eliminar varias duplicaciones con respecto a los terremotos fronterizos según la fuente principal.

El principal problema que se encuentra en la compilación del catálogo fue la necesidad de expresar los valores de magnitud de cada evento sísmico de manera homogénea, en términos de M_w o una magnitud equivalente a ésta para el caso de terremotos históricos. Esta tarea se realizó:

- i. adoptando los valores de magnitud M_w disponibles para terremotos post-1900 del catálogo de ISC-GEM (2015), de otros catálogos a escala continental y nacional, así como los valores de M_w disponibles en algunos estudios macrosísmicos recientes para eventos históricos;
- ii. transformando a magnitud M_w los valores disponibles de magnitud M_s y m_b en los diversos catálogos y estudios en la literatura, haciendo uso de las relaciones propuestas por Scordilis (2006) y de Assumpção *et al.* (2014) para Brasil, la cual es calibrada para eventos de baja magnitud;
- iii. computando valores equivalentes a M_w a partir de datos macrosísmicos utilizando el método de Bakun y Wentworth (1997) a través de relaciones de atenuación de la intensidad macrosísmica calibradas regionalmente, con base en lo que ya se ha publicado en Ecuador y Venezuela. Para eventos históricos de Colombia se calibró, en M_w , un modelo de atenuación de la intensidad macrosísmica, el cual fue aplicado utilizando la base de datos de intensidad macrosísmica del Servicio Geológico Colombiano (2013);
- iv. determinando relaciones lineales de magnitud M_w en función de la intensidad macrosísmica máxima para Argentina, Bolivia, Colombia, Perú y Chile. Dichas relaciones son aplicadas a terremotos que no tienen valoración de magnitud, pero tienen disponible un valor de intensidad máxima.

El resultado final consiste en la evaluación de

manera homogénea de parámetros para 2556 eventos en la ventana de tiempo 1513-1963 para el continente sudamericano.

2. Fuente de datos

El material público está disponible en la literatura a través de catálogos sismológicos a escala internacional y nacional. También esta disponible en estudios de terremotos que cubren diferentes periodos y áreas geográficas y son caracterizados por diferentes tipos de magnitudes e incertidumbres. En primer lugar, se consideró el material público disponible a escala continental.

2.1 Catálogos y bases de datos macrosísmica

Enseguida se describen las bases de datos:

- CERESIS (1985) consiste en el primer catálogo de terremotos y la primera base de datos macrosísmica publicada a nivel internacional para ocho países de América del Sur (Argentina, Bolivia, Brasil, Colombia, Chile, Ecuador, Perú y Venezuela). Dicho material fue compilado por el CERESIS en el ámbito del proyecto SISRA (Programa para la Mitigación y los Efectos de los Terremotos en la Región Andina). El catálogo y la base de datos provienen de compilaciones previas, análisis de sismicidad histórica y datos instrumentales. CERESIS (1985) constituye la principal base de datos de intensidades macrosísmicas y compilación de estudios de parámetros de terremotos históricos de América del Sur, indicando las fuentes de información. La base de datos contiene 16.318 puntos de intensidad macrosísmica y 3.183 terremotos en el catálogo (Figura 1a) y cubre la ventana de tiempo de aproximadamente 500 años, entre 1530 y 1985 (Giesecke *et al.*, 2004; Gómez Capera y Leschiutta, 2004). Terremotos del periodo pre-Hispánico no son incluidos. El número de eventos del periodo

pre-1964 corresponde a 2.399 entradas (Tabla 1a).

- CERESIS (1995) corresponde a la actualización del catálogo CERESIS (1985) hasta diciembre del 1991. Esta actualización fue realizada para el Programa Piloto (Dimaté et al., 1999) en el ámbito del proyecto GSHAP (Global Seismic Hazard Assessment Program; Giardini, 1999). El Programa Piloto tuvo como objetivo producir un modelo de amenaza sísmica unificado para cinco países andinos (Venezuela, Colombia, Ecuador, Perú, y Bolivia) por lo cual integró catálogos nacionales junto con la información del CERESIS (1985) y homogeneizó en términos de magnitud de onda superficial M_s . Los catálogos de Chile, Argentina y Brasil fueron incluidos. En el presente estudio la extracción de eventos del periodo pre-1964 en CERESIS (1995) corresponde a 7.667 entradas (Tabla 1a, Figura 1b)
- Engdahl y Villaseñor (2002), conocido como el "Catálogo de Terremotos del Centenario", se elaboró a escala global para terremotos del siglo XX. La magnitud para cada evento fue asignada dependiendo de la disponibilidad en los catálogos regionales. Para eventos superficiales usa preferiblemente magnitud M_w y M_s . Para eventos con profundidades mayores a 60 km se usaron la escala de magnitud M_w y m_b . Para el presente estudio la extracción de eventos del periodo 1900-1964 corresponde a 252 entradas (Tabla 1a; Figura 2a)
- Storchak *et al.* (2012 y 2013) es el catálogo de terremotos a escala global de carácter instrumental del "International Seismological Center-Global Earthquake Model" (ISC-GEM) para el periodo 1900-2009, homogéneo en M_w y con valores de incertidumbre para la magnitud. El catálogo ISC-GEM se elaboró para satisfacer las necesidades de usuarios que evalúan y modelan la amenaza y el riesgo

sísmico. Para el presente estudio la extracción de eventos corresponde a 216 entradas (Tabla 1a; Figura 2b).

La Tabla 1 resume los catálogos a escala continental que corresponden a las principales fuentes de datos consideradas en la compilación y su contribución en cuanto al número de entradas relevantes para cada fuente. Los catálogos nacionales actualizados para cada país se consideraron y fueron aportados por las instituciones que participaron en el proyecto (Tabla 1b), mientras que la Figura 1-3 muestra la distribución de las entradas de las principales fuentes de datos. La Figura 4a es un ejemplo de la información suministrada por CERESIS (1985) para el sismo histórico del 20 octubre del 1746 en Venezuela: epicentro en la zona de la cuenca del Orinoco, magnitud 7.5 M_s y 46 puntos de intensidad macrosísmica, con intensidad máxima ($I_{max}=8$) en Cumaná, la cual se localiza lejos de la zona epicentral. La Figura 4b muestra un ejemplo de un terremoto con múltiples entradas para la magnitud según la literatura: el evento de 16 de agosto de 1906 en Valparaíso, Chile.

2.2 Estudios

Además de los catálogos, se consultaron 34 estudios de terremotos que en la mayoría son citados en la Tabla 2; sólo una parte de ellos son considerados por los compiladores de los catálogos nacionales. A partir de los estudios consultados y en relación con la base de datos macrosísmica del CERESIS (1985), se observa que estudios con información de nuevos puntos de intensidad macrosísmica para diferentes terremotos históricos son propuestos en los países del norte de América del Sur: Venezuela (Palme et al., 2009; Sismicidad Histórica de Venezuela, 2011); Colombia (Espinosa, 2003; SGC, 2013; Sarabia Gómez et al., 2010; Salcedo Hurtado et al., 2007; Salcedo Hurtado y Castaño, 2011; Sarabia y Cifuentes, 2011) y Ecuador (Egred, 2004).

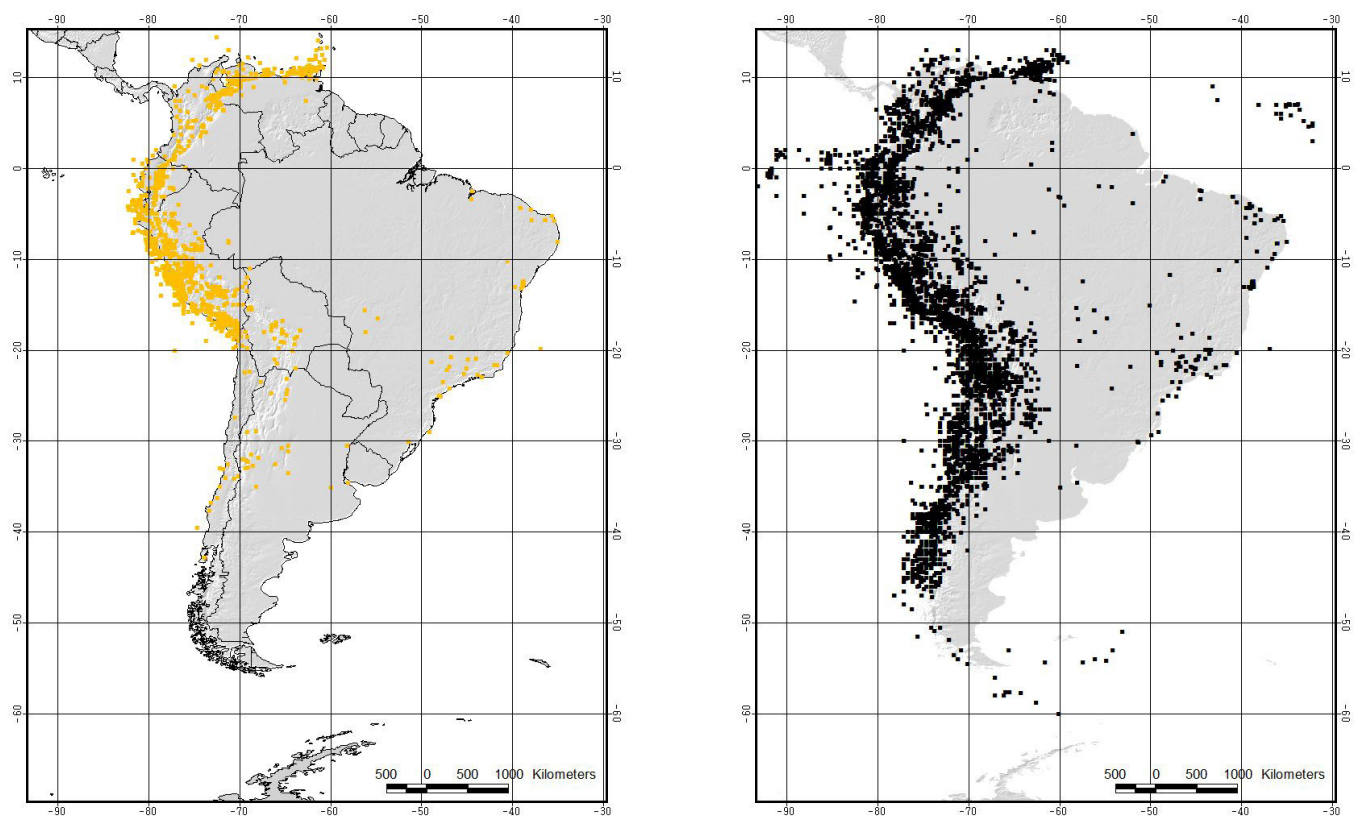


Figura 1. Epicentros en la ventana de tiempo antes de 1964. a) CERES985; b) CERES995

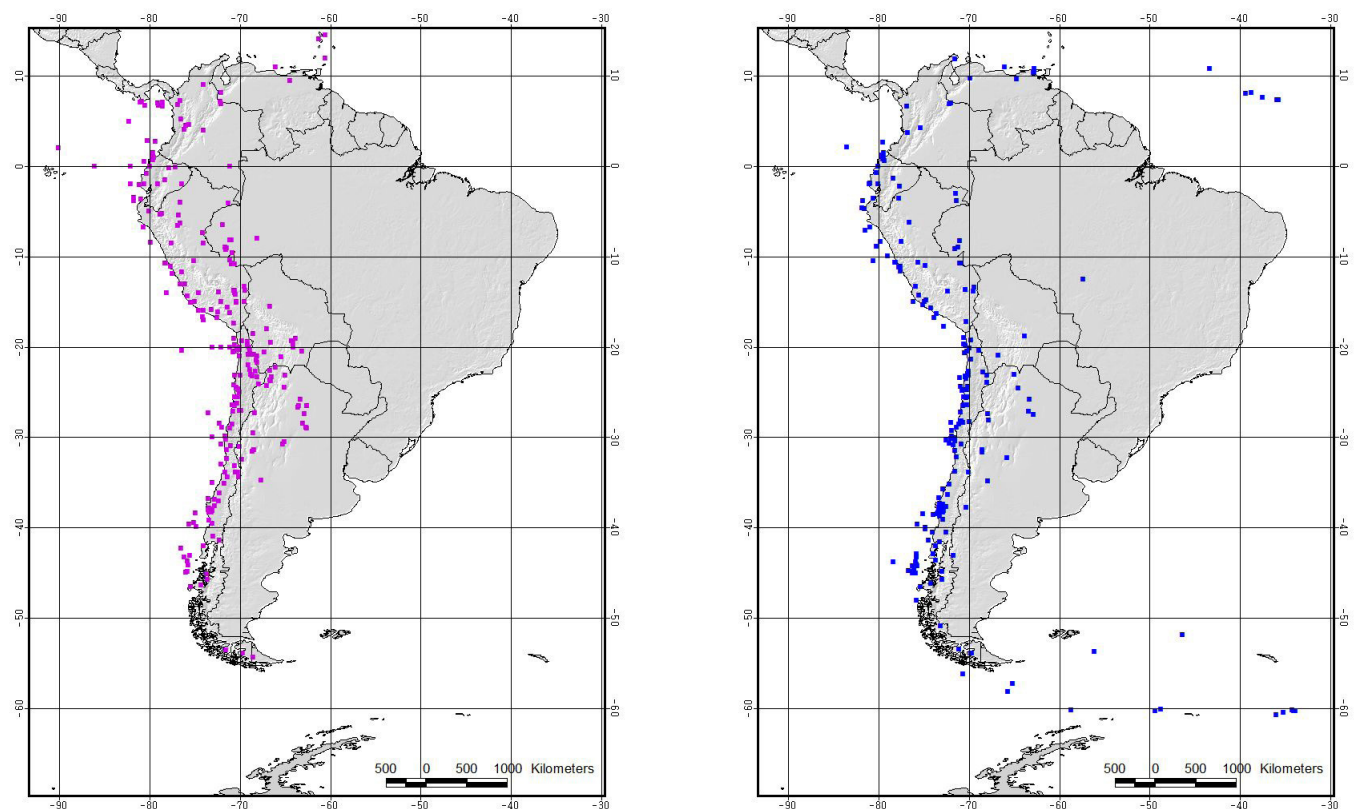


Figura 2. Epicentros en la ventana de tiempo antes de 1964. a) ENGVI002; b) ISCCE015

Tabla 1. Principales fuentes de datos consideradas y número de entradas relevantes. a) Catálogos a escala continental. Número de entradas equivale a número de terremotos. b) Catálogos nacionales

a)

*Código	Referencias abreviadas	Número de entradas
	Fuente de datos a escala continental	
CERES985	CERESIS (1985)	2.399
CERES995	CERESIS (1991)	7.667
ENGVI002	Engdahl y Villaseñor (2002)	252
ISCGE015	Storchak <i>et al.</i> (2012; 2013), ISC-GEM(2015)	216

b)

Código	País	Catálogo pramétrico	Número de entradas
OSC013	Bolivia	Observatorio de San Calixto (2013)	246
BSB012	Brasil	Catálogo Sísmico Brasileiro (2012)	203
SGC014	Colombia	Servicio Geológico Colombiano (2014)	148
ECU014	Ecuador	Catálogo de terremotos de Ecuador (2014)	134
FUN014	Venezuela	FUNVISIS (2014)	513
INPRE015	Argentina	INPRES (2015)	48
LEYAL009	Chile	Leytonet al. (2009)	484
TAVAL001	Perú	Tavera ed. (2001)	3.554

*Las siglas citadas en la columna código son usadas en las Figuras 1, 2 y 3.

a)

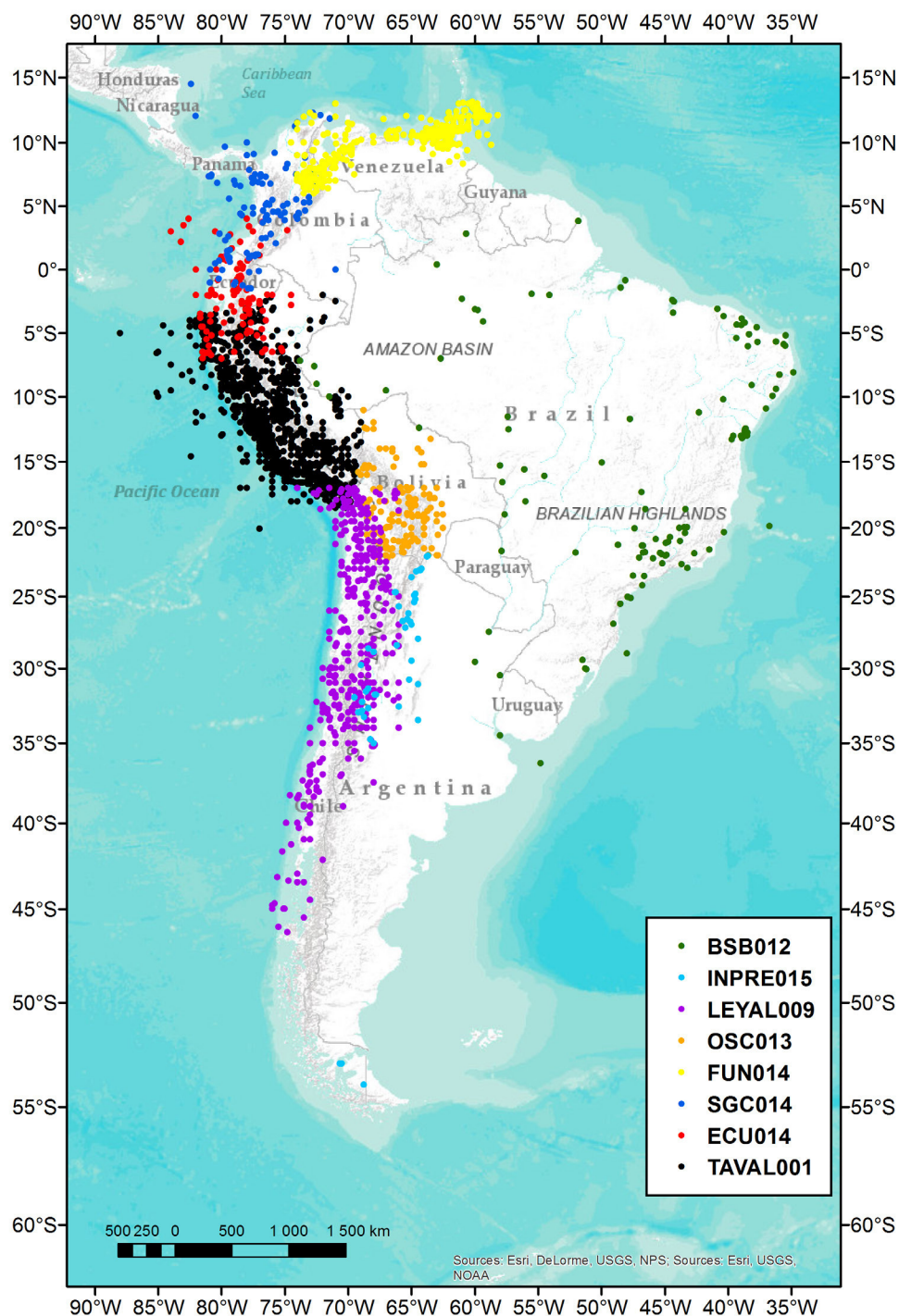
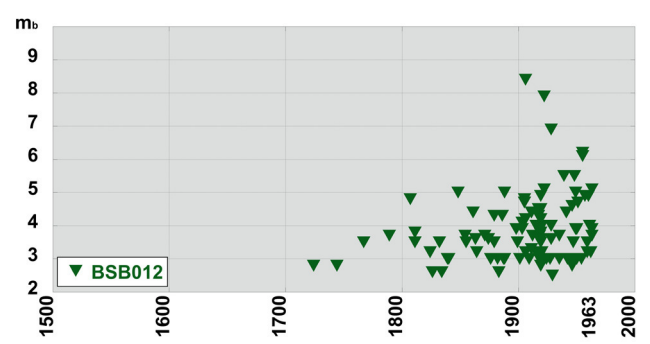
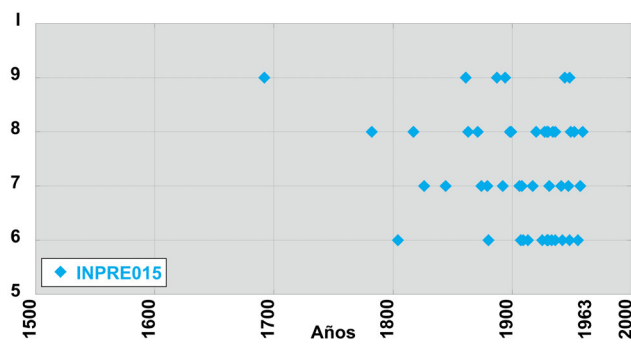
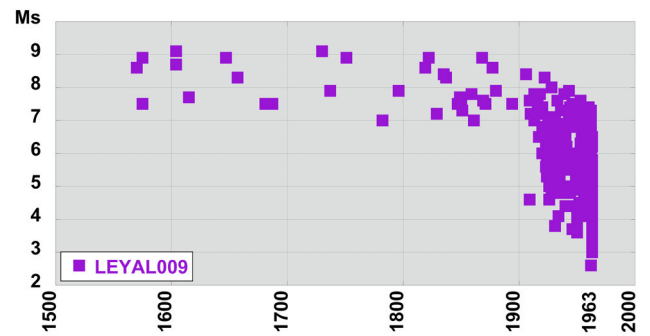
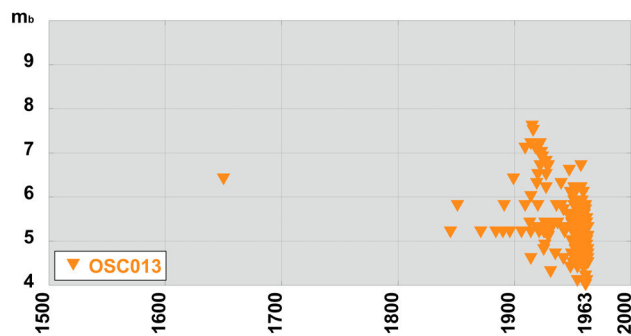
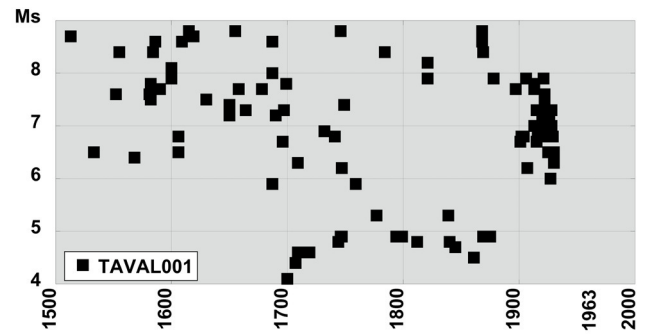
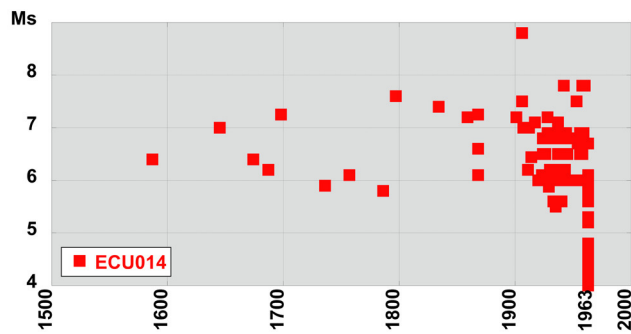
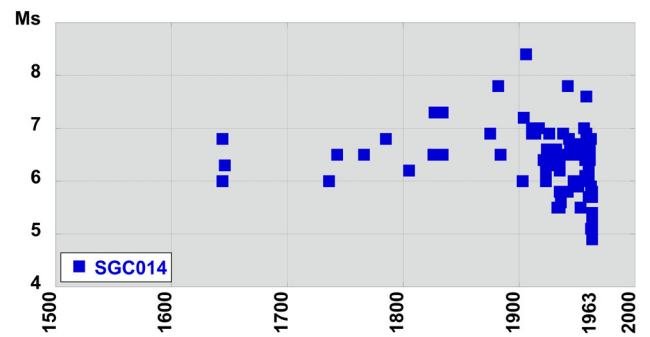
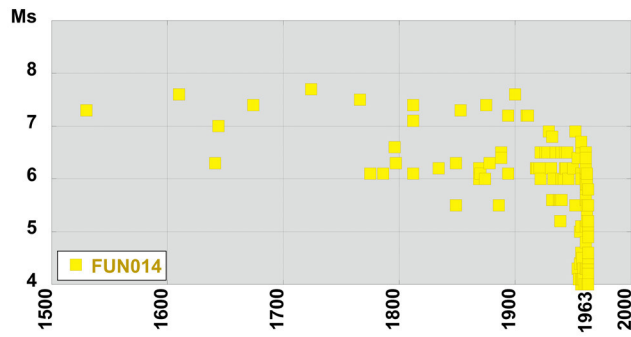


Figura 3. a) Epicentros de los catálogos nacionales en la ventana de tiempo antes del 1964. b) Historia sísmica (pre 1964): Venezuela (FUN014), Colombia (SGC014), Ecuador (ECU014), Perú. (TAVAl001), Bolivia (OSC013), Chile (LEYAL009), Argentina (INPRE015), Brasil (BSB012)

b)



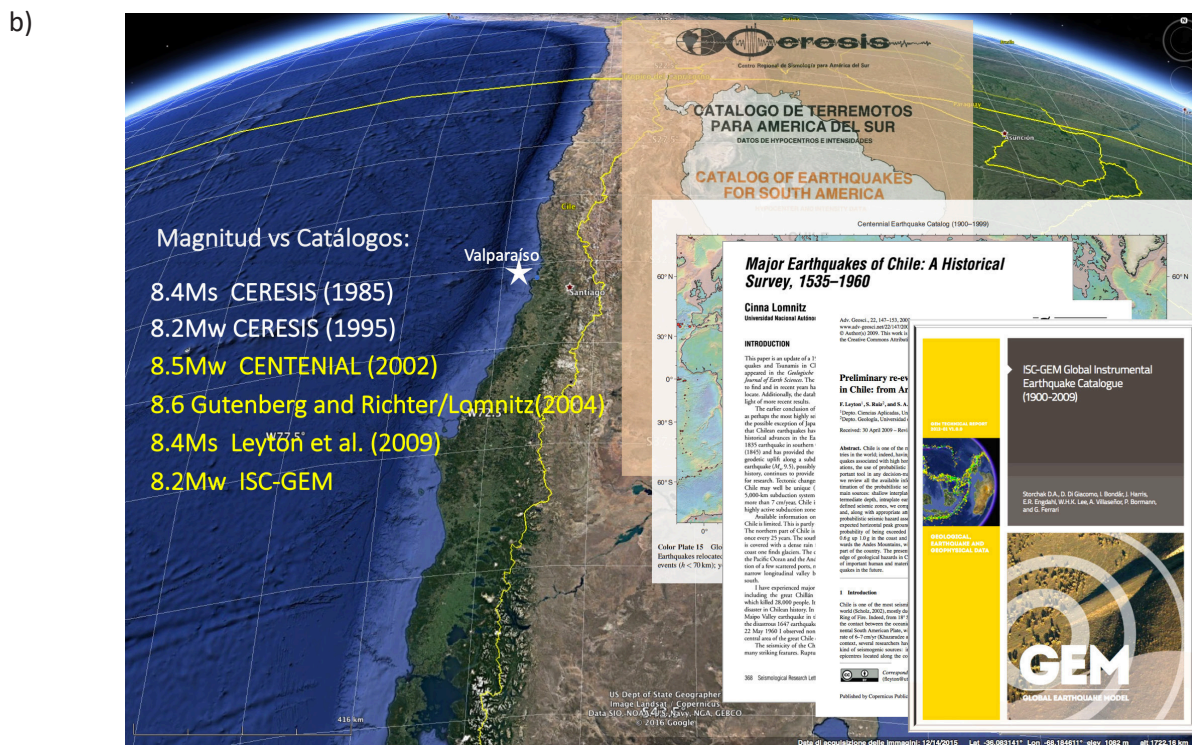
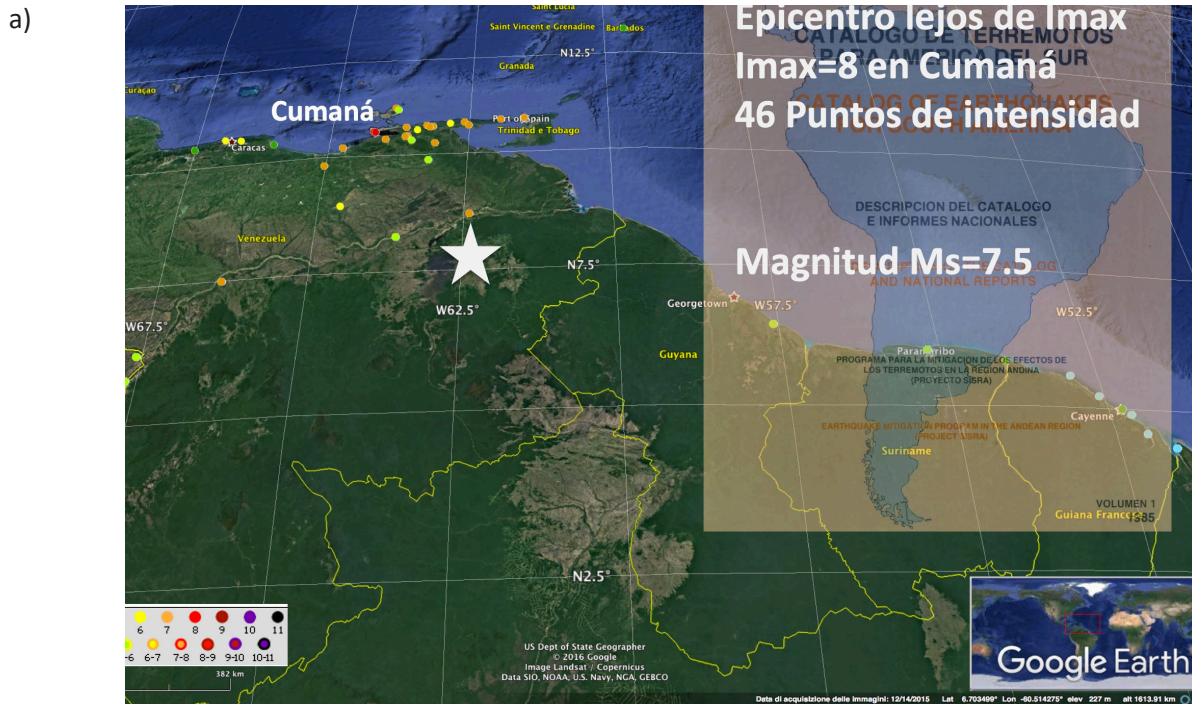


Figura 4. a) El terremoto del 21 de octubre de 1766 en Venezuela según CERESIS (1985). b) El terremoto de Valparaíso (Chile) del 16 de agosto de 1906, la magnitud es dada por seis entradas según los diferentes catálogos a escala continental (CERESIS, CENTENIAL, ISC-GEM) y nacional (Leytón *et al.*, 2009). También es citado el estudio de Lomnitz (2004) cuya fuente es Gutenberg y Richter (1956)

Tabla 2. Estudios de terremotos considerados y número relevante de entradas

AR: Argentina; CA: Mar del Caribe; CL: Chile; CO: Colombia; EC: Ecuador; PE: Perú; VE: Venezuela

Código	Referencia	Área de cobertura	No. de entradas
ALVBE006	Alvarado y Beck (2006)	AR	2
AUDE999	Audemard (1999)	VE	1
ALVAL009	Alvarado et al. (2009)	AR	1
BEAAL010	Beauval et al. (2010)	EC	18
BEAAL013	Beauval et al. (2013)	EC	12
CHOAL010	Choy et al. (2010)	VE	2
CIST012	Cisternas (2012)	CL	1
DIMAL005	Dimaté et al. (2005)	VE	8
DORAL990	Dorbath et al.(1990)	PE	16
DOREL981	Dorel (1981)	CA	1
EGRE004	Egred (2004)	EC	1
ESPI003	Espinosa (2003)	CO	7
GOMAL014a	Gómez-Capera et al. (2014a)	CO	1
GOMAL014b	Gómez-Capera et al. (2014b)	CO	1
GOMAL016	Gómez-Capera et al. (2016)	CO	32
KINAL008	Kingland et al. (2008)	VE	1
LOMNI004	Lomnitz (2004)	CL	38
MOCQ007	Mocquet (2007)	VE	1
PALAL005	Palme et al. (2005)	VE	8
PALAL009	Palme et al. (2009)	VE	3
RENLA000	Rengifo y Laffaille (2000)	VE	1
SALAL007	Salcedo Hurtado et al.(2007)	CO	1
SALGO013	Salcedo Hurtado y Gómez-Capera (2013)	CO	1
SALCA011	Salcedo Hurtado y Castaño (2011)	CO	1
SARAL010	Sarabia Gómez et al. (2010)	CO	1
SARCI011	Sarabia y Cifuentes (2011)	CO	19
SGC013	SGC (2013)	CO	52
SHIVE011	Sism. Hist. Ven. (2011)	VE	48
SISFR010	SisFrance (2015)	CA	4
TELPE005	Tello y Pérez (2005)	AR	1
UDIAL012	Udías et al. (2012)	CL	4

Para Perú, Chile, Argentina y Brasil, estudios con nuevos datos de intensidad macrosísmica no han sido realizados, por lo cual los datos macrosísmicos del CERESIS (1985) siguen siendo vigentes para esos países.

En la Tabla 2 son listados estudios de terremotos históricos que tienen asignación de magnitudes a partir de datos macrosísmicos (Dimaté *et al.*, 2005; Palme *et al.*, 2005; Beauval *et al.*, 2010; Choy *et al.*, 2010; Beauval *et al.*, 2013; Gómez Capera *et al.*, 2014a; Gómez Capera *et al.*, 2014b). En particular, en el proyecto SARA, las magnitudes M_w para 32 terremotos históricos de Colombia son evaluadas y son presentadas en la sección 5.1 del presente artículo.

Parámetros de terremotos para grandes eventos del Perú y Chile son compilados a partir de los estudios de Cisternas (2012), Dorbath *et al.* (1990), Lomnitz (2004) y Udías *et al.* (2012).

También son considerados estudios de evaluación de parámetros de terremotos a escala continental (Abe, 1979; Abe y Noguchi, 1983; Tanner y Shepherd, 1997) y estudios donde el dato macrosísmico complementa los análisis obtenidos con la neotectónica (Audemard, 1999; Alvarado y Beck, 2006; Alvarado *et al.*, 2009).

Fueron revisados estudios para eventos históricos en el mar del Caribe (Dorel, 1981; SisFrance, 2015). Como ejemplo, se destaca un nuevo escenario de intensidades macrosísmica y parámetros para el terremoto del 21 de octubre del 1766 en la isla de Trinidad, según el estudio de Mocquet (2007) en Figura 5a. Para este mismo evento histórico, en la Figura 5b se observa la diferencia de 400 km entre el epicentro en CERESIS (1985) y el propuesto por Mocquet (2007).

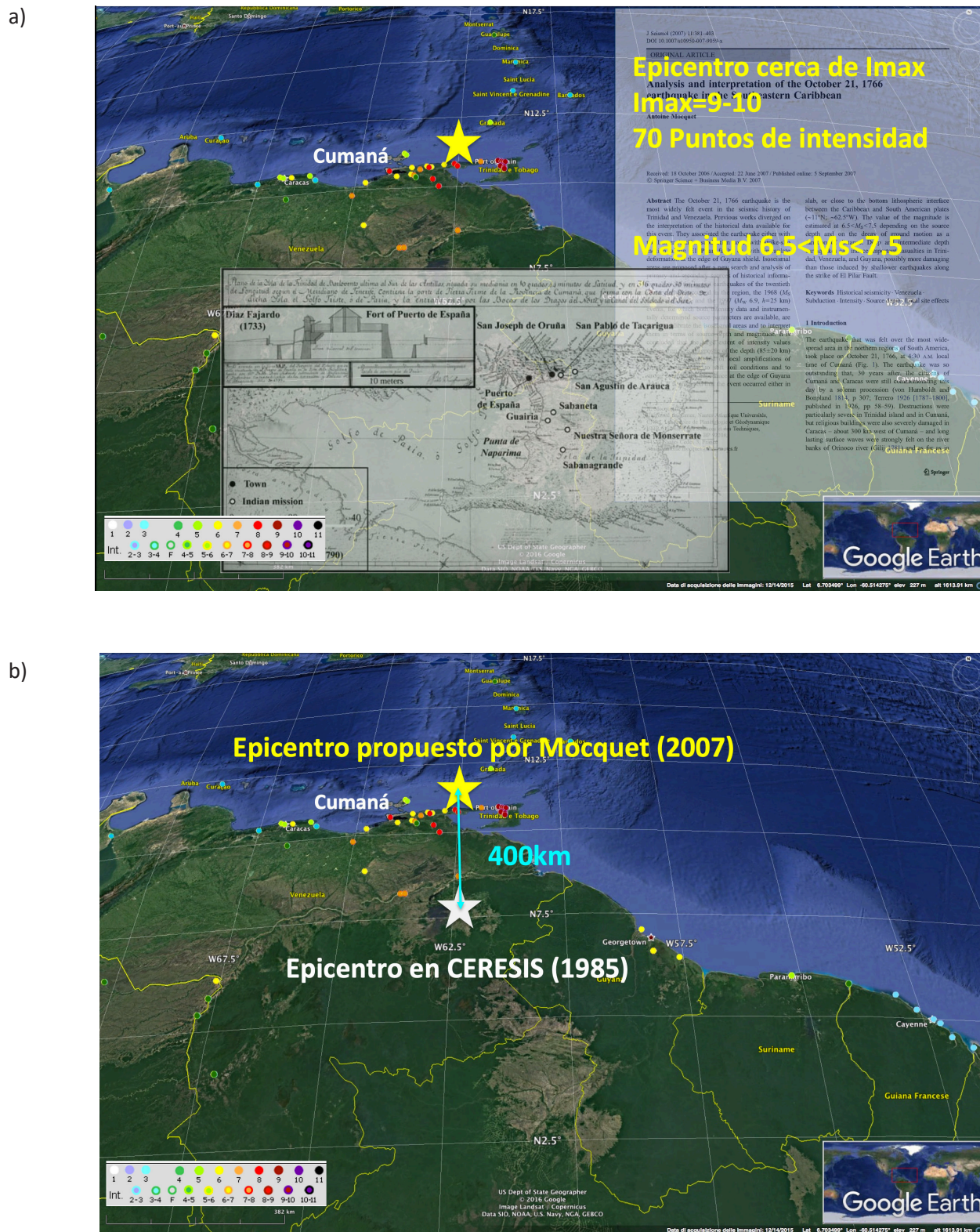


Figura 5. a) El terremoto del 21 octubre del 1766 según el estudio de Mocquet (2007). b) El terremoto del 21 octubre del 1766: comparación entre el epicentro en CERESIS (1985) y en Mocquet (2007).

Para los grandes terremotos ($M \geq 7.0$), el inventario compilado en el marco del proyecto GEM-GEH (Global Earthquake History, 2013; Albini *et al.*, 2014) ha sido una fuente importante.

Las entradas relacionadas con el mismo evento se agruparon. Esta operación se realizó en dos pasos: primero, automáticamente, luego manualmente. El último permitió detectar y eliminar varias duplicaciones, principalmente dentro del catálogo del CERESIS (1995) con respecto a los terremotos fronterizos. En la Figura 3 se presenta la distribución geográfica de terremotos según los catálogos nacionales y sus correspondientes historias sísmicas, para dar una idea de la distribución temporal de los eventos sísmicos.

3. Tiempo, localización y profundidad

A partir del inventario crítico dado por la fuente de datos, una entrada por cada terremoto se seleccionó como "preferida" con referencia al tiempo, localización y profundidad focal. La prioridad se dio de acuerdo con el siguiente orden jerárquico de tipo decreciente:

- (1) catálogo ISC-GEM (2015)
- (2) Engdahl y Villaseñor (2002)
- (3) estudios recientes (Tabla 2)
- (4) catálogos paramétricos de carácter nacional (Tabla 1b)
- (5) catálogo CERESIS (1995)
- (6) catálogo y base de datos macrosísmica CERESIS (1985)

Sin embargo, cuando las entradas de los catálogos nacionales coinciden claramente con las de CERESIS (1995), esta última se selecciona, por que es la raíz de las entradas en dichos catálogos y, además, corresponde a la actualización de CERESIS (1985) que cita las fuentes primarias.

Después de compilar el material mencionado se observa que en el período anterior a 1964 el catálogo CERESIS (1995) contiene más entradas que los catálogos nacionales que se consideraron en el proyecto SARA; dichos catálogos nacionales son aportados por los participantes del proyecto, o encontrados en línea en internet para los casos de Argentina y Perú. Se observa que algunas entradas de CERESIS (1995) no se incluyeron en algunos catálogos nacionales debido al umbral de magnitud considerado. Por otra parte, algunas entradas definidas como desconocidas para CERESIS (1995) se encuentran en algunos catálogos nacionales.

Por último, para cada terremoto se compiló una fila que corresponde a la entrada preferida de acuerdo al análisis según el orden jerárquico, adoptando el tiempo, la localización y la profundidad respectiva.

4. Tamaño del terremoto

4.1 El tamaño del terremoto en las fuentes de datos

Un inventario del tipo de magnitud de los datos de entrada se realizó para luego homogeneizar en términos de M_w . Las fuentes de datos que se consideraron proporcionan diversos tipos de magnitud y en algunos casos son definidas a partir de regresiones entre diferentes variables que expresan la magnitud del terremoto, así como las siglas que las definen (M_s o m_b). Por ejemplo, los datos de ingreso del CERESIS (1995) están dados principalmente en magnitud de onda superficial M_s , magnitud de onda volumétrica m_b , y magnitud local M_L ; se observa que muchos eventos de Ecuador y Perú asignan el tipo de magnitud con la sigla "K", dicha sigla corresponde a la relación (Tabla 3) propuesta por Gutenberg y Richter (1956), que evalúa la

Tabla 3. Conversión de magnitud M de "otro tipo" a Ms o mb

Sigla de Magnitud	Catálogo	Comentario	Conversión final
M	BO	La sigla "M" indica M_L en el correspondiente catálogo de Bolivia del CERESIS (1985), se determina a partir de la relación : $M_L = 1.08 + 0.6228 I_0$ donde I_0 es la intensidad epicentral. Se observa que esta relación es muy similar a otras fórmulas propuestas y aplicadas en CERESIS (1985) que define Ms. La magnitud "M" se adoptada como Ms.	Ms
G	BO	La sigla G indica magnitud local en el volumen del CERESIS (1985) correspondiente al catálogo de Bolivia; dicho tipo de magnitud es citada por CERESIS (1995) como magnitud m_b .	m_b
K	EC PE	En los volúmenes del CERESIS (1985) correspondientes a los catálogos de Ecuador y Perú, la sigla "K" indica Ms evaluada a partir de la intensidad epicentral usando la relación de Gutenberg y Richter (1956): $M = 2/3 I_0 + 1$	Ms
m	EC	La sigla "m" se define como Ms en Abe (1981) para eventos de Ecuador.	Ms
UK	CL	La sigla "UK" indica casos donde la magnitud se desconoce en Engdahl y Villaseñor (2002) para eventos de Chile. En el catálogo chileno se expresa en Ms, por lo cual en el presente trabajo, se considera como Ms.	
B	CL	La sigla "B" indica MB en Abe (1979), por lo cual es considerada como m_b para algunos casos de eventos en Chile.	Ms
F	PE	La sigla "F" indica Ms en Abe y Noguchi (1983) para algunos eventos del Perú.	m_b
I	PE	La sigla "I" define una magnitud determinada a partir de la intensidad macrosísmica máxima usando una serie de regresiones propuestas en el catálogo del Perú por CERESIS (1985). Tal magnitud se adopta en el presente trabajo como Ms.	Ms
Sin tipo se escala	PE	CERESIS (1995) lista un conjunto de magnitudes sin definir la escala para algunos eventos del Perú, pero son citadas con la Fuente LCO (Leónidas Ocola). En otros casos, cuando LCO es citado, aparece como: • magnitudes mayores que 6 son Ms • magnitudes menores que 6 son m_b En el presente trabajo se adopta dicha regla.	Ms o m_b
Sin tipo de escala	CO	El catálogo colombiano (SGC, 2014) presenta un evento con escala de magnitud desconocida. Las magnitudes de terremotos históricos en Colombia tendencialmente se expresan en Ms (Espinosa <i>et al.</i> , 2004) por lo cual se adopta dicha escala de magnitud para dicho evento.	Ms

magnitud M_s a partir de la intensidad epicentral o intensidad máxima. Otros casos particulares del tipo de magnitud en los datos de entrada son llevadas en términos de magnitud M_s o m_b a partir de la información dada por las fuentes de dichos datos, más ejemplos son descritos en la Tabla 3.

En este trabajo se adoptó un valor de magnitud según el siguiente esquema de prioridad:

- (1) M_w , (2) M_s , (3) m_b , otros tipos (4) M .

CERESIS (1985 y 1995) proporcionan información sobre los valores de intensidad macrosísmica (máxima o percibida al sitio) que son útiles para evaluar la magnitud usando relaciones empíricas entre ellas [$M_w=f(\text{intensidad})$], para aquellos terremotos que no tienen asignación de ningún tipo de magnitud, pero tienen información macrosísmica.

Después de adoptar el esquema de prioridad de magnitud, la situación en el intervalo de tiempo (1500-1963) de la distribución del tipo de magnitud en CERESIS (1995) se presenta en la Tabla 4. Se observa que, para un total de 7667 terremotos, sólo 12 eventos, que corresponde

al 0.2%, están dados en magnitud M_w , el 18.8% en M_s , el 11.7% en m_b ; el 3.5% están dados en otros tipos de magnitud y la mayoría de eventos (65.8%) no tienen asignación de ningún tipo de magnitud.

El catálogo de Engdahl y Villaseñor (2002) proporciona diferentes tipos de magnitud, incluyendo eventos con magnitud desconocida los cuales se identifican con la sigla UK (unknown) (Tabla 3). El catálogo de ISC-GEM (2015) es homogéneo en magnitud M_w por lo que se adoptan en el presente estudio y corresponde a eventos post-1900.

Los catálogos nacionales de terremotos son compilados a través de proyectos de amenaza sísmica en los países de la región y son publicados con diferentes tipos de magnitud e intensidad. Por ejemplo, para el caso de terremotos históricos de Argentina (INPRES, 2015), un listado de eventos es público en línea en términos de la intensidad macrosísmica máxima VI≤IX de la escala de Mercalli Modificada (MM); dicho listado es de carácter descriptivo, con daños y/o víctimas ocasionados por cada terremoto; la Tabla 5 resume los tipos de magnitud o intensidad máxima para cada catálogo nacional.

Tabla 4. Tipo de magnitud en CERESIS (1995) y números relevantes.

País	Ventana de Tiempo	N de entradas	M_w	M_s	m_b	M (otras)	No tienen M
Argentina	1692-1963	554		111	146	3	294
Bolivia	1650-1963	202		47	123	10	22
Brazil	1720-1963	268		24	207	1	36
Chile	1520-1963	1247	4	254	86	4	899
Colombia	1566-1963	783		705	20	2	56
Ecuador	1541-1963	721		70	78	167	406
Peru	1471-1963	3544	8	180	202	16	3138
Venezuela	1530-1963	348		54	32	67	195
Total	pre 1964	7667	12	1445	894	270	5046

Tabla 5. Tipos de magnitud en los catálogos nacionales de terremotos

País	Código Catálogo	Tipo de magnitud
Bolivia	OSC013	M_s , m_b
Brasil	BSB012	m_b
Colombia	SGC014	M_w , M_s , m_b
Ecuador	ECU014	M_w , M_s , m_b
Venezuela	FUN014	M_s
Argentina	INPRE015	I_{xx} (MM)
Chile	LEYAL009	M_s
Peru	TAVAl001	M_s , M_w

En cuanto a los estudios de terremotos históricos, los más modernos, en Ecuador y Venezuela (Beauval *et al.*, 2010, Palme *et al.*, 2005), proporcionan parámetros tales como la magnitud equivalente a M_w , que es calculada a partir de datos macrosísmicos, usando un modelo de atenuación de la intensidad calibrado en M_w y el método de Bakun y Wentworth (1997). El caso de Colombia se presenta en la sección 5. Las magnitudes no evaluadas en términos de M_w , M_s o m_b , como se observa en los ejemplos de la Tabla 3, se convirtieron a M_s o m_b de acuerdo a la descripción y formatos dados en sus correspondientes fuentes de datos. Además, cuando se encontraron dos o más valores de magnitud M_w , o de M_s , de diferentes fuentes bibliográficas para el mismo terremoto, se seleccionó una de ellas de acuerdo al esquema de prioridad citado en la sección 3. Como regla general, se prefirió la magnitud cuyo origen es conocido es decir, son referidas las fuentes y métodos usados. En esta etapa, se dispone de valores de magnitud M_w para el 34% de las entradas, por lo tanto, la tarea fue determinar la magnitud M_w para aproximadamente 66% de entradas.

4.2 Convirtiendo magnitud M_s o m_b a magnitud M_w

Un conjunto de relaciones de conversión de carácter empírico se consideró para transformar la magnitud M_s y m_b a magnitud M_w . Dichas relaciones se resumen en la Tabla 6, y se grafican en las Figuras 6a y 6b. Las relaciones de Scordilis (2006) son preferidas en el presente estudio porque suministran la desviación estándar y porque se observa que proporcionan valores similares hasta las vecindades de $M_w=8.0$ a los predichos por ISC-GEM (Storchak *et al.*, 2012 y 2013; Lolli *et al.*, 2014).

Para el rango de magnitud $M_w>8.0$ se observa que los tres modelos divergen. Por ello son adoptadas las magnitudes dadas por los diferentes estudios de terremotos históricos, así como en las suministradas por los catálogos homogéneos del periodo pos-1900. Por ejemplo:

- las magnitudes M_w de grandes sismos históricos del Perú son tomadas del estudio de Dorbath *et al.* (1990), por ejemplo (Figura 7) para el terremoto del 28 octubre de 1746 en Lima y Callao es adoptada la $M_w=8.6$ de dicho estudio y el epicentro de CERESIS (1985) ;

Tabla 6. Relaciones de conversión consideradas

Fuente	Relación	Rango	σ
Scordilis(2006)	$M_w = 0.67(\pm 0.005)M_s + 2.07(\pm 0.03)$	$3.0 \leq M_s \leq 6.1$	0.17
Scordilis (2006)	$M_w = 0.99 (\pm 0.02)M_s + 0.08(\pm 0.13)$	$6.2 \leq M_s \leq 8.2$	0.20
Scordilis(2006)	$M_w = 0.85 (\pm 0.04)m_b + 1.03 (\pm 0.23)$	$3.5 \leq m_b \leq 6.2$	0.29
ISC-GEM (Storchak <i>et al.</i> , 2012)	$M_w = 0.67 M_s + 2.13$	$M_s \leq 6.47$	
ISC-GEM (Storchak <i>et al.</i> , 2012)	$M_w = 1.10 M_s - 0.67$	$M_s > 6.47$	
ISC-GEM (Storchak <i>et al.</i> , 2012)	$M_w = e^{(-4.66+0.86m_b)} + 4.56$	$4.5 \leq m_b \leq 6.0$	
Assumpção <i>et al.</i> , (2014)	$M_w = 1.21 m_b - 0.76$	$1.6 \leq m_b \leq 5.5$	0.32
Contreras Luarte (2009)	$M_w = 1.32m_b - 1.56$	$5.0 \leq m_b \leq 5.5$	-
Contreras Luarte (2009)	$M_w = 1.00M_s + 0.07$	$5.6 \leq M_s \leq 7.5$	-
Lolli <i>et al.</i> (2014)	$M_w = \exp(2.133+0.063M_s) - 6.205$	$M_s \leq 5.5$	0.17
Lolli <i>et al.</i> (2014)	$M_w = \exp(-0.109+0.229M_s) + 2.586$	$M_s > 5.5$	0.15
Lolli <i>et al.</i> (2014)	$M_w = \exp(0.741+0.210m_b) - 0.785$	$3.6 \leq m_b \leq 7.2$	0.33

σ corresponde a la desviación estándar

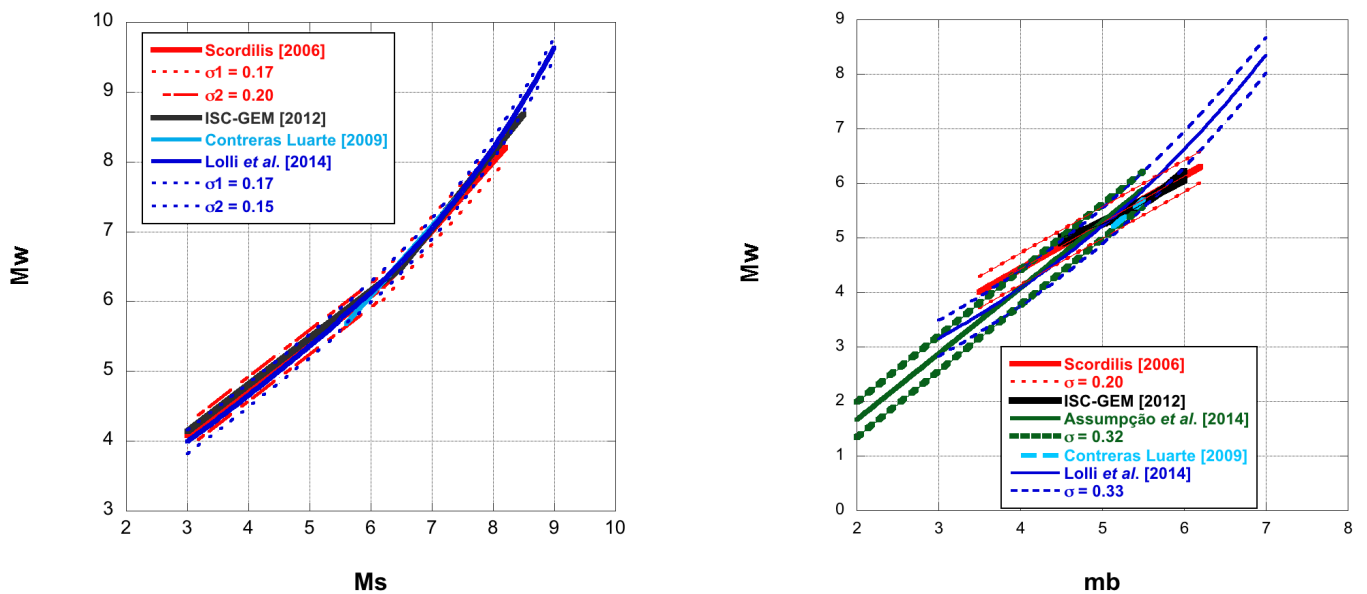


Figura 6. Comparación entre a) relaciones de conversión de M_s a M_w ; b) relaciones de conversión de m_b a M

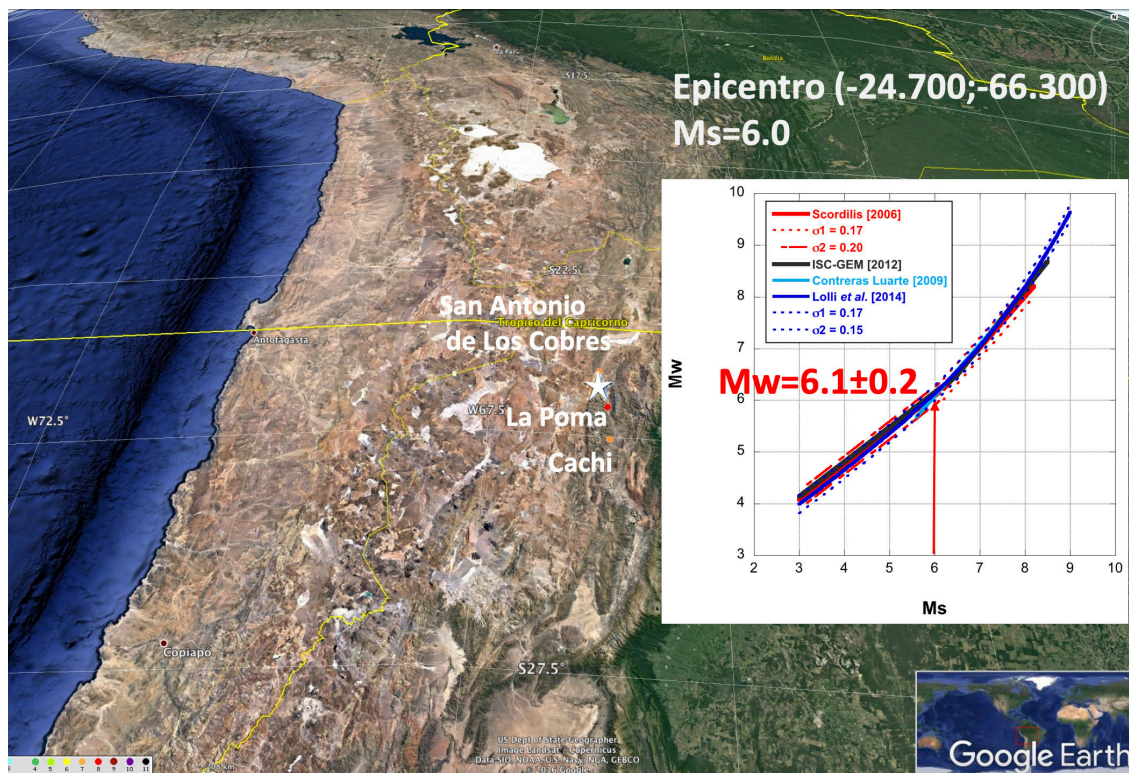


Figura 9. Conversión de magnitud M_s a M_w para el terremoto del 24 de diciembre de 1930, La Poma (Argentina). Los puntos de intensidad, epicentro y magnitud 6.0 M_s son dados por CERESIS (1985).

- ii) el evento chileno conocido como el terremoto de Valdivia del 22 de mayo de 1960 ($M_w=9.60\pm0.30$), la magnitud y el epicentro son adoptados directamente del catálogo ISC-GEM (2015) (Figura 8).

Como se observa en la Tabla 6, la aplicabilidad de Scordilis (2006) se concentra para los eventos sísmicos en dos rangos de M_s ($6.2 \leq M_s \leq 8.2$; $3.0 \leq M_s \leq 6.1$) con sus correspondientes relaciones de conversión a M_w . Por ejemplo en la Figura 9, se observa la conversión de magnitud M_s a M_w para el terremoto de La Poma en la Puna Argentina del 25 diciembre de 1930; la fuente de la magnitud M_s y del epicentro es CERESIS (1985).

Para el caso de eventos con magnitud m_b , una relación de conversión es dada para el rango $3.5 \leq m_b \leq 6.2$.

También se consideraron las relaciones

propuestas por Contreras Luarte (2009) para Chile, pero su rango de definición es muy limitado. Para Brasil se adoptó la relación lineal de Assumpção et al. (2014) que muestra un comportamiento diferente en comparación a Scordilis (2006) y Storchak et al., (2012).

Las relaciones de Scordilis (2006) proporcionan incertidumbres que son expresadas por la desviación estándar respecto al valor medio de las correspondientes relaciones empíricas.

5. Determinando M_w a partir de datos macrosísmicos

Las entradas de eventos sísmicos que no tienen asociado ningún tipo de magnitud, pero tienen información macrosísmica en los datos de entrada, son muchas. En particular 5046 eventos con tales características son encontrados en CERESIS (1995); como se observa en la Tabla (4), la mitad de estos eventos corresponden a terremotos del Perú. A partir de los datos

macrosísmicos, el método más adecuado para determinar la magnitud equivalente a Mw sería hacer uso de algoritmos como los propuestos por Bakun y Wentworth (1997) y Gasperini *et al.* (1999; 2010). Sin embargo, para la modelación de la magnitud de un terremoto a partir de datos macrosísmicos, dichos métodos requieren dos elementos:

- i) modelos de atenuación de la intensidad macrosísmica, los cuales deben ser calibrados en Mw para la región de estudio;
- ii) suficientes puntos de intensidad macrosísmica del terremoto del cual se van a modelar los parámetros.

No obstante la disponibilidad de la base de datos macrosísmica del CERESIS (1985), instituciones de Venezuela, Ecuador y Colombia han continuado la investigación en sismicidad histórica y han propuesto nuevos estudios para la evaluación de puntos de intensidad macrosísmica, ya sea para terremotos históricos como recientes (Egred, 2004; Sismología Histórica de Venezuela, 2011). A partir de dichos estudios, son evaluados parámetros de terremotos históricos de los Andes de Mérida en Venezuela (Palme de Osechas *et al.*, 2005; Choy *et al.*, 2010), y de los valles interandinos de Ecuador (Beauval *et al.*, 2010; Beauval *et al.*, 2013); los resultados de tales estudios son adoptados en el presente trabajo. Colombia dispone de una nueva base de datos macrosísmicos de terremotos históricos y recientes que están en continua actualización en paralelo con estudios de sismicidad histórica (Servicio Geológico Colombiano, 2013). Dicha base de datos se aplica para evaluar parámetros de 29 terremotos históricos; la evaluación se describe en el sección 5.1.

De igual manera, para eventos que no tienen ningún tipo de magnitud asignada en los datos de entrada pero que disponen de al menos un punto de intensidad macrosísmica, el método que se

adopta corresponde a la aplicación de relaciones lineales de carácter empírico entre la Mw y la intensidad macrosísmica máxima a partir de análisis numérico de las relaciones de atenuación propuestas en literatura para Venezuela y Ecuador (párrafo 5.2), y determinando regresiones, en el presente estudio, para el Perú-Chile, Colombia, Bolivia y Argentina (párrafo 5.3).

5.1 Evaluando Mw en Colombia a partir de datos de intensidad macrosísmica

El método de Bakun y Wenworth (1997)

Un modelo de atenuación de la intensidad macrosísmica se calibró con terremotos superficiales del territorio colombiano y luego se aplicó, usando el método de Bakun y Wenworth (1997), para la evaluación de parámetros de terremotos históricos a partir de puntos de intensidad macrosísmica. Dicho método requiere que la funcional que representa el modelo de atenuación de la intensidad tenga físicamente dos componentes con las siguientes características:

- i) que la intensidad macrosísmica sea directamente proporcional a la magnitud del terremoto, es decir, corresponde a la componente del parámetro energético de la fuente del evento.
- ii) que la intensidad macrosísmica decaiga con la distancia desde el epicentro para una profundidad focal dada, es decir, corresponde a la componente espacial que expresa la atenuación, sea anelástica y geométrica.

Tradicionalmente es usada una funcional de tipo logarítmica-lineal de la distancia y lineal con la magnitud momento (Mw):

$$I_{ij} = a + bMw_j - cR_{ij} - d\log R_{ij} \quad (1)$$

donde Mw_j es la magnitud del j -ésimo terremoto ($j=1, \dots, Neq$), siendo Neq el número de

terremotos usados en el proceso de calibración de la ecuación (1), R_{ij} es la distancia hipocentral ($R = (x^2 + h^2)^{1/2}$) para el j -ésimo terremoto sentido en el sitio i , h la profundidad focal, que en la versión original los autores fijan a 10km, I_{ij} es la intensidad macrosísmica en el sitio i ocasionada por el j -ésimo terremoto.

Para sismos donde $h < 60$ km se ha encontrado en este tipo de estudio que el modelo de atenuación es poco sensible con la profundidad focal h (Bindi *et al.*, 2013). Los coeficientes a , b , c y d se calibran en el presente trabajo. En particular, c corresponde al coeficiente de atenuación anelástica y d al coeficiente de atenuación geométrico (Howell y Schultz, 1975). Para el caso de un terremoto histórico, el método de Bakun y Wenworth (1997) aplica la ecuación (1) para modelar la magnitud a partir de sólo los datos de intensidad macrosísmica; dicha magnitud calculada es equivalente a la M_w si en el proceso de calibración se utilizan sismos con magnitudes en esa escala; dicho proceso se presenta en la siguiente sección.

Calibración del modelo de atenuación de la intensidad macrosísmica y aplicación

Para realizar el proceso de calibración del modelo de atenuación (1) en el presente estudio, se seleccionaron ocho terremotos superficiales (profundidad $h \leq 36$ km) del periodo 1917-2008 con parámetros de carácter instrumental (M_w y coordenadas del epicentro) y simultáneamente con datos de intensidad macrosísmica para cada sismo. Por ejemplo, el evento del 25 de enero de 1999, conocido como el terremoto de Armenia, es escogido para el proceso de calibración con las siguientes características (Figura 10):

- i) el epicentro es dado por la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC) y la magnitud (6.14 M_w) por el catálogo de ISC-GEM (2015)

- ii) 46 puntos de intensidad macrosísmica son publicados por la base de datos del SGC (2013) en escala macrosísmica europea (EMS98); dicha base de datos esta soportada por sus correspondientes fuentes.

La selección de los ocho terremotos citados en la Tabla 7, corresponde a sismos superficiales de la zona andina y cubren un rango de magnitud $5.11 \leq M_w \leq 7.11$ e incertidumbres menores de 0.30 unidad de M_w . Los parámetros instrumentales se tomaron del catálogo ISC-GEM (2015) y del SGC (2014) el cual cita fuentes. En la Figura 11 se visualizan la base de datos de puntos de intensidad de los ocho eventos con sus correspondientes epicentros citados en la Tabla 7.

Vacíos de información pueden ser observados en el decaimiento de los puntos de intensidad con la distancia, para cada uno de los ocho terremotos, debido a muchos factores, como la distribución de la población a lo largo de los valles andinos, la directividad de la propagación de la energía sísmica a lo largo de las cordilleras, así como factores como la baja densidad de población en algunas regiones.

Para la gestión del vacío de información en el decaimiento de los puntos de intensidad macrosísmica con la distancia, se aplicó la estrategia de usar la media y la mediana de la distancia hipocentral. Estas se evaluaron para cada clase de intensidad macrosísmica de cada uno de los terremotos usados en el proceso de calibración del modelo de atenuación. La Figura 12 presenta cuatro ejemplos de dicha estrategia: los círculos azules representan los niveles de intensidad macrosísmica; la media y la mediana de la distancia hipocentral para cada clase de intensidad son representadas por los cuadrados verdes abiertos y rojos, respectivamente. Las barras verdes representan ± 1 desviación estándar con respecto al valor medio de la distancia hipocentral.

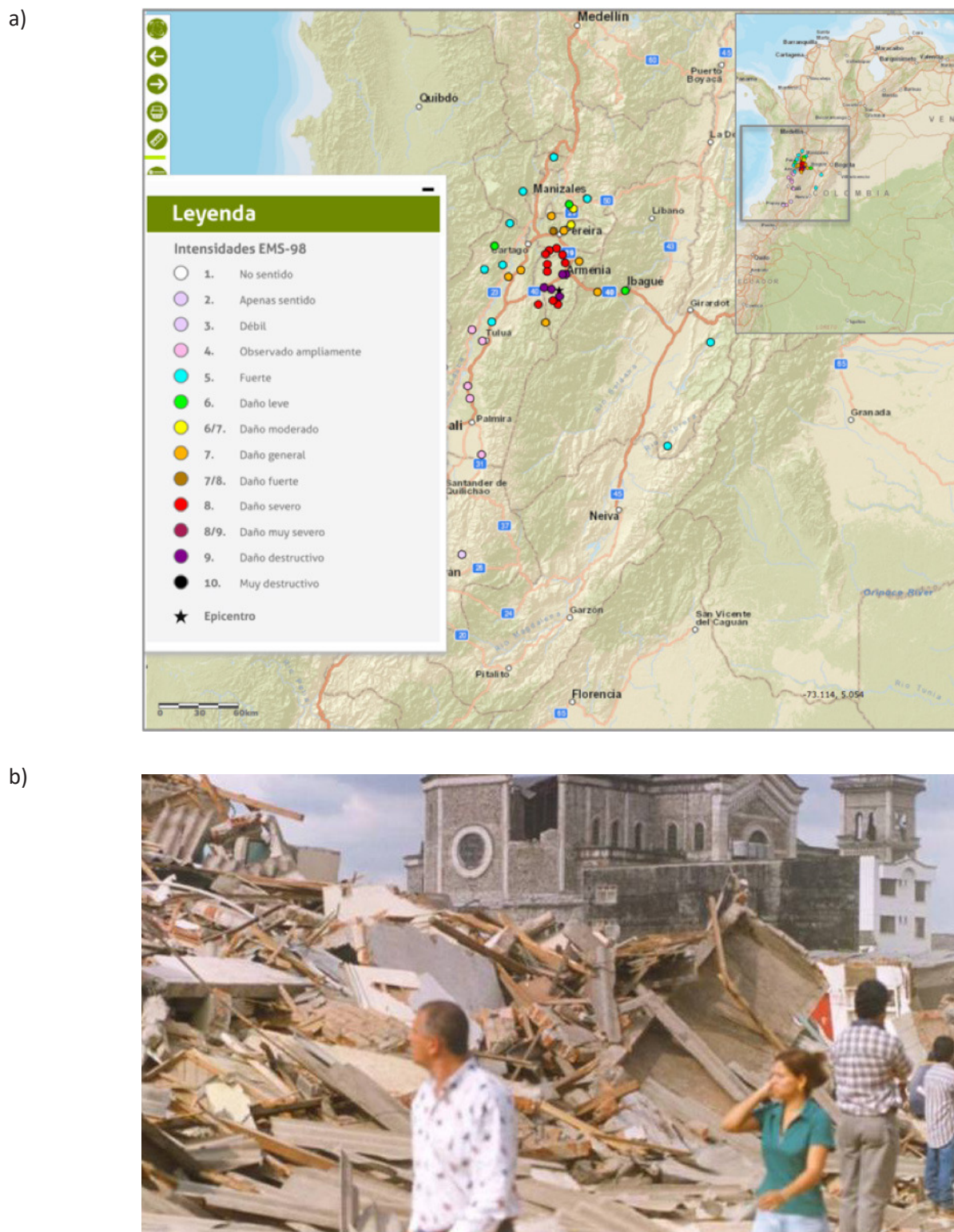


Figura 10. El evento del 25 de enero del 1999 conocido como el terremoto de Armenia. a) Puntos de intensidad macrosísmica del SGC (2013), se observa que la intensidad en Armenia es 9(EMS98). b) Fotografía del evento en la ciudad de Armenia. (Fuente: http://caracol.com.co/emisora/2016/01/25/armenia/1453727445_582883.html).

Tabla 7. Terremotos seleccionados para la calibración del modelo de atenuación de la intensidad macrosísmica en Colombia

N	Fecha	Área	Epicentro		Fuente Epicentro	Mw	Error Mw	Fuente Mw / o Transf.	Profundidad Focal	Fuente Profundidad	I Max (EMS98) (SGC013)	N MDP (SGC013)
			Lat	Long								
1	1917.08.31	Suroriente de Cundinamarca	4.000	-74.000	Ramírez (1975)	6.91	0.20	¹ SCORD	15	SGC013	9	56
2	1942.05.22	Girardot	4.500	-75.000	SGC013	5.96	0.17	² SCORD	20	SGC013	7	19
3	1967.02.09	Colombia	2.930	-74.830	ISCGE015	7.00	0.30	ISCGE015	36	SGC013	10	100
4	1988.03.19	El Calvario	4.430	-73.790	SGC013	5.11	0.29	³ SCORD	13.5	SGC013	6	8
5	1992.10.18	Murindó	7.090	-76.770	ENGVI002	7.11	0.10	ISCGE015	5	ENG-VI002	10	121
6	1995.01.19	Tauramena	5.030	-72.950	RSNC	6.51	0.10	ISCGE015	17	ENG-VI002	8	78
7	1999.01.25	Armenia	4.440	-75.700	RSNC	6.14	0.10	ISCGE015	17	NEIC	9	46
8	2008.05.24	Quetame	4.400	-73.810	RSNC	5.90	0.10	ISCGE015	9	NEIC	8	21

Magnitudes transformadas a Mw usando SCORD (Scordilis, 2006) a partir de: ¹Ms=6.90 (Abe,1981), ²Ms=5.80 (SGC, 2013), ³m_b=4.80 (SGC, 2013) RSNC: Red Sismológica Nacional de Colombia (2015)

El conjunto de medianas para cada clase de intensidad y de cada uno de los ocho eventos sísmicos son usadas para calibrar los coeficientes de la ecuación (1) que explícitamente se obtiene como:

$$I = -1.92 + 2.33M_w - 0.0021R - 3.68\log R \quad (2)$$

El modelo de atenuación de la intensidad macrosísmica calibrado en Mw dado por la ecuación (2) es caracterizado con una desviación estándar $\sigma=0.50$, que corresponde al orden de medio grado de intensidad macrosísmica.

Los coeficientes fueron:

- i) verificados con los mismos terremotos usados en la calibración, determinando magnitudes calculadas con los datos de intensidad (Mwi) en la Figura 13a; dichas magnitudes calculadas reproducen las magnitudes instrumentales

(Mw) dentro de un óptimo grado de incertidumbre;

- ii) validados a partir de la determinación de la magnitud (Mwi), usando los puntos de intensidad macrosísmica de cuatro terremotos que son independientes del conjunto de terremotos usados en el proceso de calibración (Tabla 8). El proceso de validación del modelo (2) determina si el uso los coeficientes calibrados conduce a resultados realistas del cálculo de la magnitud Mw. Los resultados son mostrados en la Figura 13b, en la cual se observan los valores de la magnitudes calculados (Mwi) por el modelo (2) y los valores instrumentales (Mw), cuyas diferencias son menores de 0.3 unidad de Mw, que están dentro del grado de incertidumbre tradicionalmente observados con datos instrumentales.

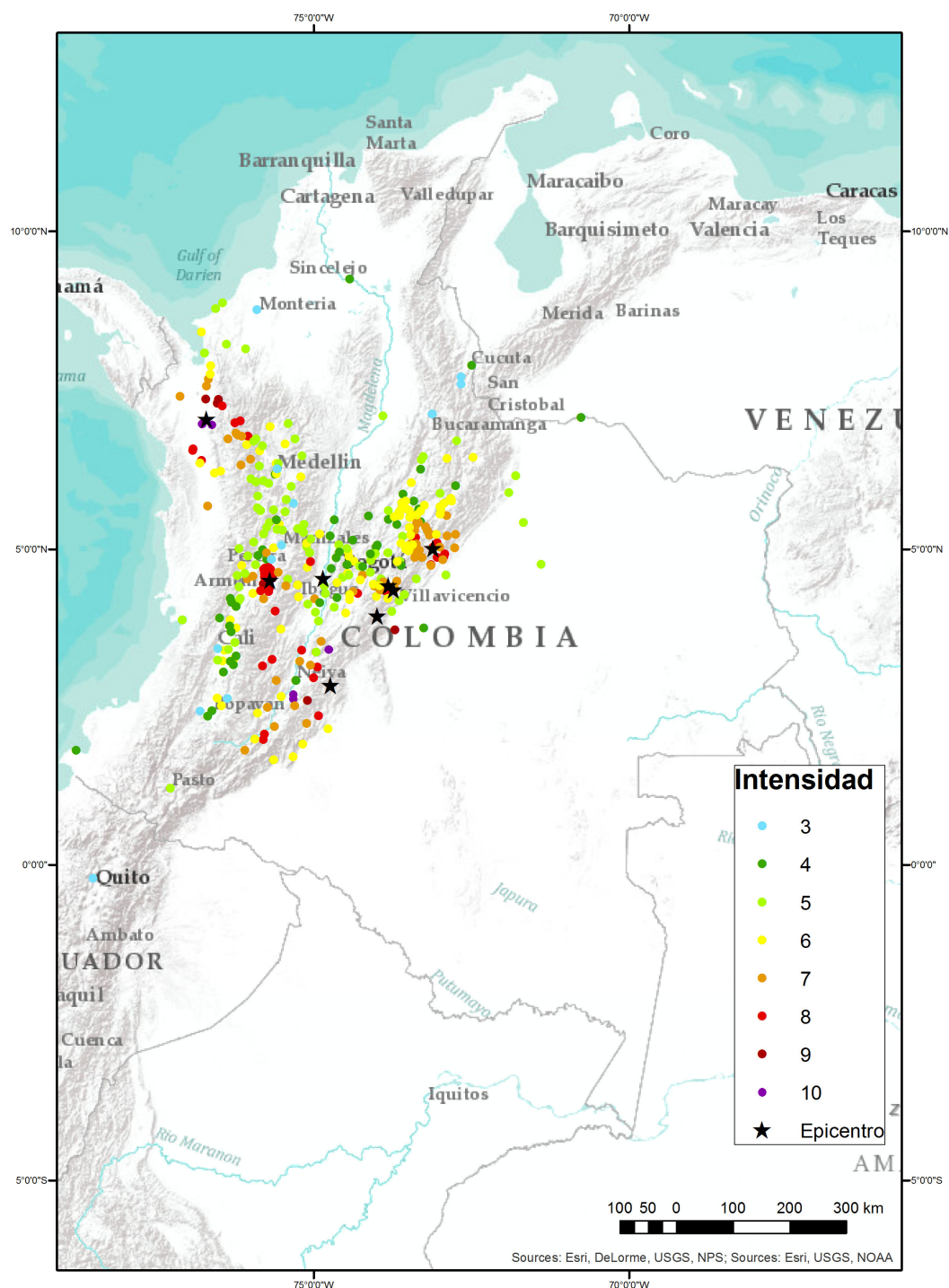


Figura 11. Datos macrosísmicos y epicentros de ocho terremotos usados en la calibración del modelo de atenuación de la intensidad macrosísmica para Colombia

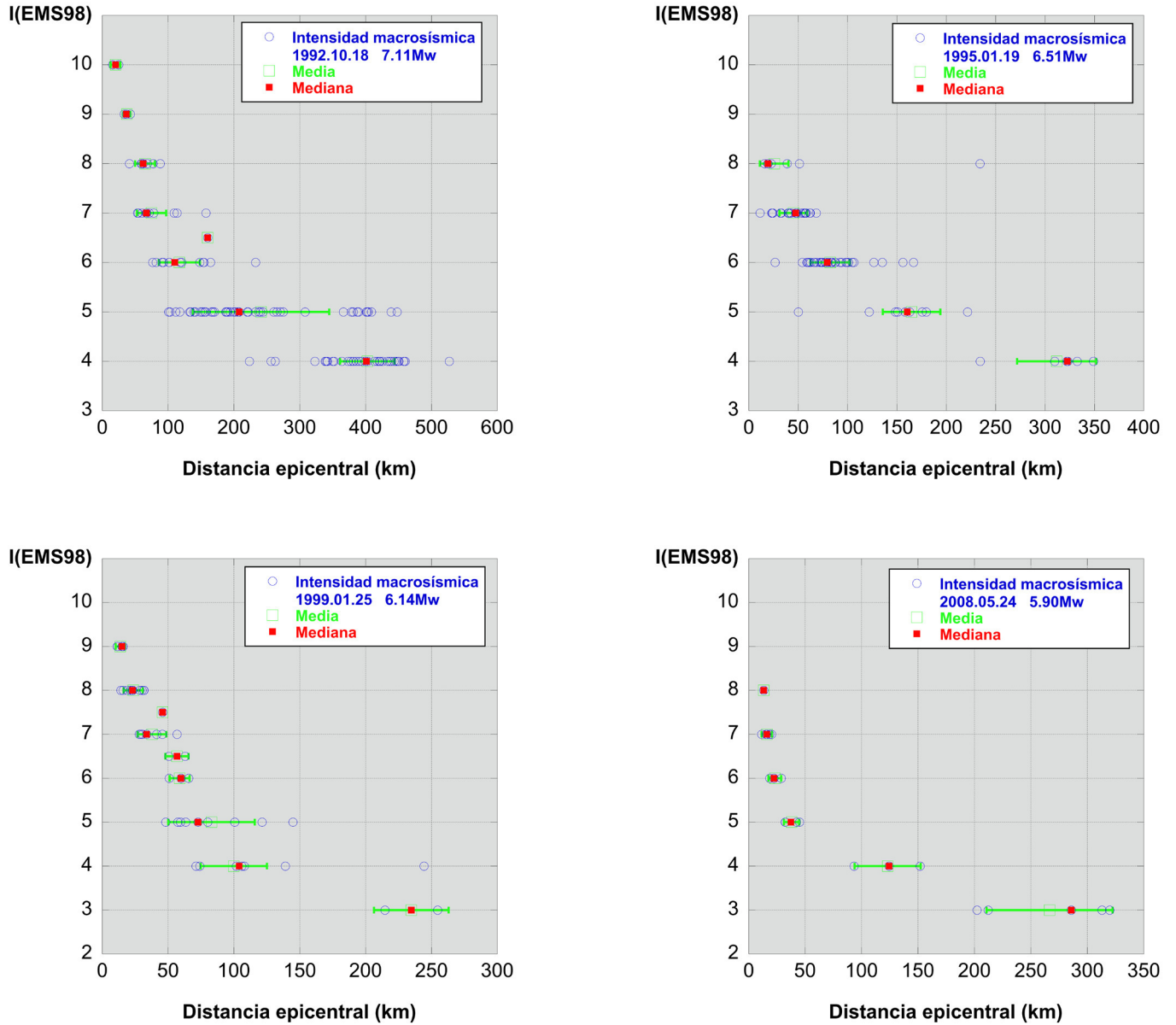


Figura 12. Intensidad vs distancia hipocentral de los puntos de intensidad macrosísmica para terremotos usados en el proceso de calibración del modelo de atenuación macrosísmica para Colombia.

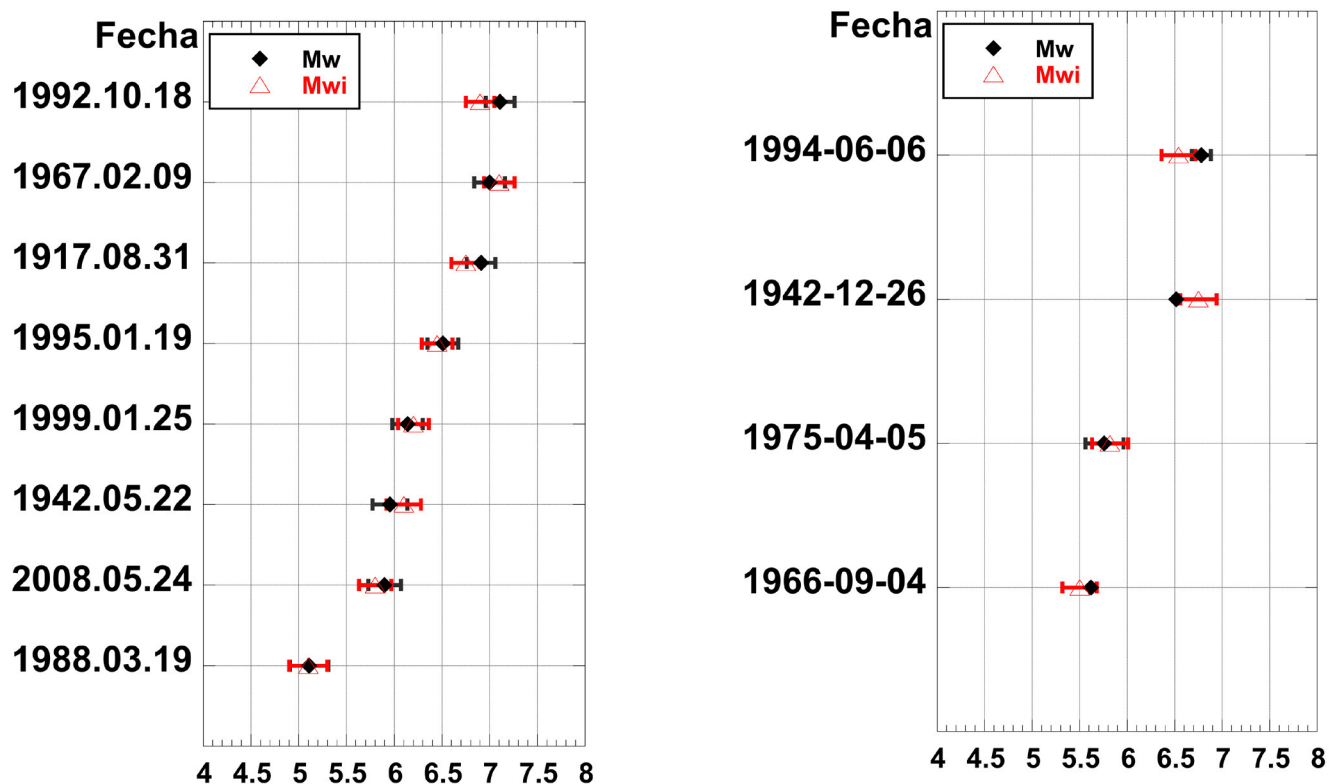


Figura 13. Valores instrumentales (color negro) y calculados (color rojo) de la magnitud Mw y sus correspondientes barras de incertidumbre. a) Eventos usados en el proceso de calibración; b) eventos usados en el proceso de validación

Tabla 8. Terremotos seleccionados para la validación del modelo de atenuación de la intensidad macrosísmica en Colombia

N	Fecha	Área	Epicentro		Fuente Epicentro	Mw	Error Mw	Fuente Mw / o Transf.	Pro- fun- didad Focal	Fuente Profundi- dad	I Max (EMS98) (SGC013)	N MDP (SGC013)
			Lat	Long								
1	1942.12.26	Lorica	9.190	-75.810	SGC013	6.52	-	¹ SCORD	35	SGC (2014)	8	12
2	1966.09.04	Choachí	4.483	-74.115	SGC013	5.62	-	² SCORD	4.6	SGC (2014)	7	17
3	1975.04.05	Cartagena	10.147	-75.557	ISCGE015	5.76	0.20	ISCGE015	45	ISC-GEM	6	14
4	1994.06.06	Paez	2.889	-75.949	ISCGE015	6.78	0.10	ISCGE015	10	ISC-GEM	8	34

Magnitudes transformadas a Mw usando SCORD (Scordilis, 2006) a partir de: ¹Ms=6.50 (CERESIS, 1995), ²Ms=5.62 (SGC, 2013)

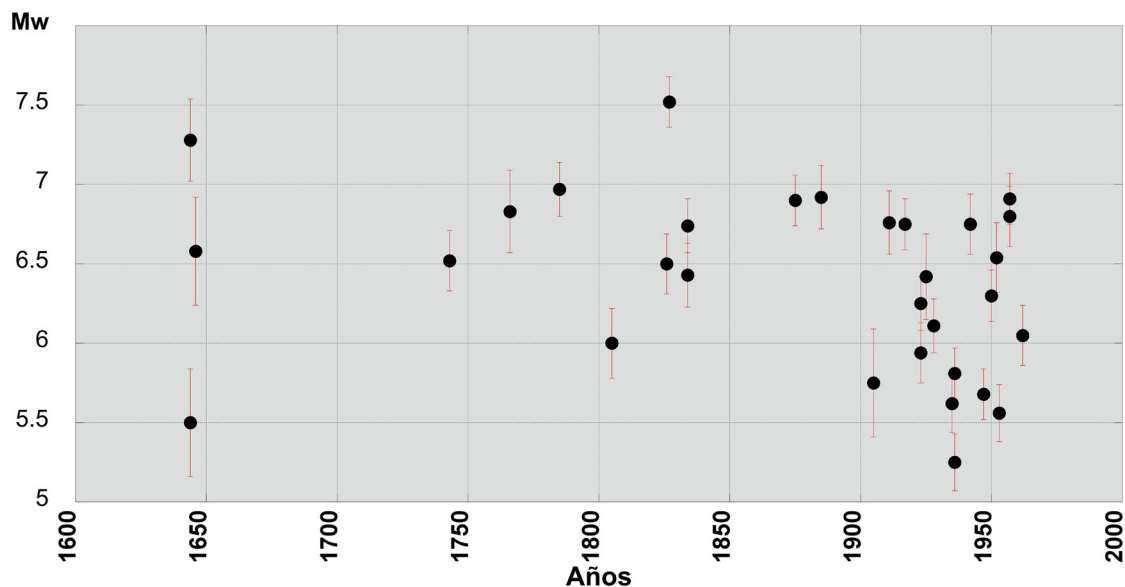


Figura 14. Magnitud M_w calculada a partir de solo datos de intensidad macrosísmica para 29 terremotos históricos de Colombia del periodo 1644-1963

El modelo (2) se aplicó para evaluar los parámetros de 29 terremotos históricos de Colombia, del periodo 1644-1963, cuya historia sísmica es visualizada en la Figura 14 y son incorporados en la presente compilación del catálogo de terremotos para América del Sur.

5.2 M_w como función lineal de la intensidad a partir de relaciones disponibles en la literatura

El catálogo CERESIS (1995) enlista 5046 eventos que no tienen asignación de ningún tipo de magnitud, pero muchos de ellos tienen al menos un punto de intensidad macrosísmica. Dicha información macrosísmica puede ser usada para evaluar la magnitud del evento aplicando relaciones entre la magnitud (M_w) y la intensidad máxima observada (I_{max}).

La estrategia aplicada, para eventos de Venezuela y Ecuador, fue evaluar la magnitud (M_w) como función de la I_{max} , usando aproximaciones de las relaciones de atenuación propuestos por *Palme et al.* (2005) y *Beauval et al.* (2010). A partir de dichas relaciones de atenuación, funciones lineales entre la magnitud y la intensidad máxima se obtuvieron aplicando la condición física que en las vecindades del epicentro ($x=0$ km), la intensidad alcanza su valor máximo (Tabla 9).

Las ecuaciones obtenidas para Venezuela y Ecuador se aplicaron para asignar la magnitud (M_w) a 5 y 72 terremotos, respectivamente. Por razones de homogeneidad (*Palme et al.*, 2005; *Beauval et al.*, 2010) la incertidumbre final de M_w es asignada igual a 0.60 unidad, que corresponde a la media del nivel de confianza del 95% a un punto de intensidad macrosísmica siguiendo el método de Bakun y Wentworth (1997, 1999).

Tabla 9. Magnitud como función de I_{max} a partir de relaciones de atenuación de la intensidad macrosísmica

País	Fuente	Relación de atenuación de la intensidad macrosísmica	Mw = f(I _{max}) (para distancia epicentral igual a cero)
VE	Palme <i>et al.</i> , (2005)	$I = -2.2237 + 1.6684 M_w - 0.041214x$ x es la distancia epicentral en km y $x \leq 120\text{km}$	$M_w = 1.3328 + 0.5993 I_{\max}$
EC	Beauval <i>et al.</i> , (2010)	$I = -0.85 + 2.41 M_w - 5.39 \log \Delta_h$ Δ_h es la distancia hipocentral en km $\Delta_h = (x^2 + h^2)^{0.5}$ h es la profundidad focal fija a 10km	$M_w = 2.58921 + 0.41494 I_{\max}$

5.3 Magnitud como función lineal de la intensidad a partir de nuevos modelos

En la literatura no están disponibles relaciones entre la intensidad macrosísmica y la Mw para Colombia, Perú, Chile, Bolivia y Argentina, que puedan ser aplicadas para eventos que no tienen Mw asignada pero que tienen disponible poca información macrosísmica. En el presente estudio son calibradas cuatro relaciones lineales $M_w = f(I_{\max})$ para los cinco países citados.

La relación lineal para el área del Perú y Chile, se obtuvo utilizando 42 terremotos, cuyos valores de Mw e intensidad máxima se tomaron de CERESIS (1995), ISC-GEM (2015) y de los boletines sísmicos en línea del IGP (Instituto Geofísico del Perú, 2015). El conjunto de 42 eventos cubre un rango amplio de magnitud Mw (5.42 - 8.19) y de intensidad máxima [5 – 11]. Se realizó el mismo procedimiento para el área de Colombia, Bolivia y Argentina. Las fuentes de datos y los resultados de regresiones se muestran en la Tabla 10.

Por razones de homogeneidad, para los eventos donde se aplicaron las regresiones obtenidas y descritas en Tabla 10, la incertidumbre final de Mw es asignada igual a 0.60 unidad (Bakun y Wentworth, 1997).

6. Resultados y conclusiones

Un umbral de magnitud Mw inferior es definido a 5.0 Mw (-0.2) con incertidumbre de hasta 4.8 para los terremotos en las áreas de la región andina; para Brasil no es definido un umbral más bajo porque los eventos sísmicos son de magnitudes pequeñas ($M_w < 4.8$) y no pertenecen a la región andina. De esta manera se han obtenido 2556 terremotos homogéneos en magnitud Mw, cuya distribución de epicentros por fuentes de datos se presenta en la Figura 15. En dicha figura se observa que, a lo largo del continente, la mayor contribución de los datos de entrada es dada por CERESIS (1995). Para los países septentrionales (Venezuela, Colombia y Ecuador), los estudios recientes de terremotos en los valles interandinos constituyen la principal fuente de datos de entrada. Se evidencia la contribución de los catálogos nacionales principalmente en Bolivia y Chile, así como las recientes actualizaciones en Ecuador, Colombia y Venezuela. Para el Perú, Brasil y Argentina la principal fuente de parámetros de terremotos históricos siguen siendo los datos del CERESIS. El correspondiente inventario del número de entradas efectivo por fuentes está descrito en la Tabla 11.

Luego de haber homogeneizado la magnitud a 2556 terremotos, por primera vez es posible visualizar la sismicidad en términos de magnitud momento para América del Sur en el periodo

Tabla 10. Relaciones M_w/I_{max} obtenidas para el Peru-Chile, Colombia, Bolivia y Argentina

Area	Fuente de datos	$M_w=f(I_{max})$	No. de terremotos	Rango de M_w	Rango de Intensidad	Periodo
BO	CERES995 Bolivian Catalogue	$M_w = 3.9438+0.292 I_{max}$	18	4.94-6.47	4-8	1650-1928
PE CL	CERES995 ISCGE015 *IGP015	$M_w = 4.513+0.286 I_{max}$	42	5.42-8.19	5-11	1906-2014
CO	SGC013 ISCGE015 *RSNC	$M_w = 2.761+0.425 I_{max}$	18	4.30-7.11	4-10	1917-2015
AR	CERES995 ISCGE015 INPRES015	$M_w = 2.901+0.4287 I_{max}$	24	4.86-7.45	5-9	1903-2002

*IGP= Instituto Geofísico del Perú (2015); *RSNC: Red Sismológica Nacional de Colombia (2015)

Tabla 11. Fuente de datos, número efectivo de entradas y distribución del tamaño del terremoto en la fuente datos

Fuente de datos	N de entradas	M_w	M_s	m_b	I
CERESIS (1985)	12		1		11
CERESIS (1995)	1955	4	841	691	419
Engdahl and V. (2002)	47	4	28	15	
Storchaket al. (2013; 2015)	214	214			
Catálogos Nacionales	241	1	140	81	19
Estudios	87	79	4		4
Total	2556	302	1014	787	453

1500-1963 según la Figura 16. También se visualiza la sismicidad del continente por intervalos de 100 años, que refleja diferencias en cuanto a la historia sísmica distribuida geográficamente en sus respectivos periodos, desde la Conquista y Colonia (Figura 17a – 17d) hasta llegar al siglo XX, que está caracterizado por la gran influencia de la era instrumental (Figura 17e).

En la Figura 18 se visualiza la historia sísmica de América del Sur según la magnitud momento ($M_w \geq 5.0$), siempre para el periodo (1500-1963); se observa como el vacío de información, del periodo de la Conquista, Colonia e Independencia de la Corona Española, se enriquece a medida que se acerca el siglo XX. La Figura 19 muestra una comparación entre el catálogo desarrollado en el presente estudio y el propuesto por ISC-

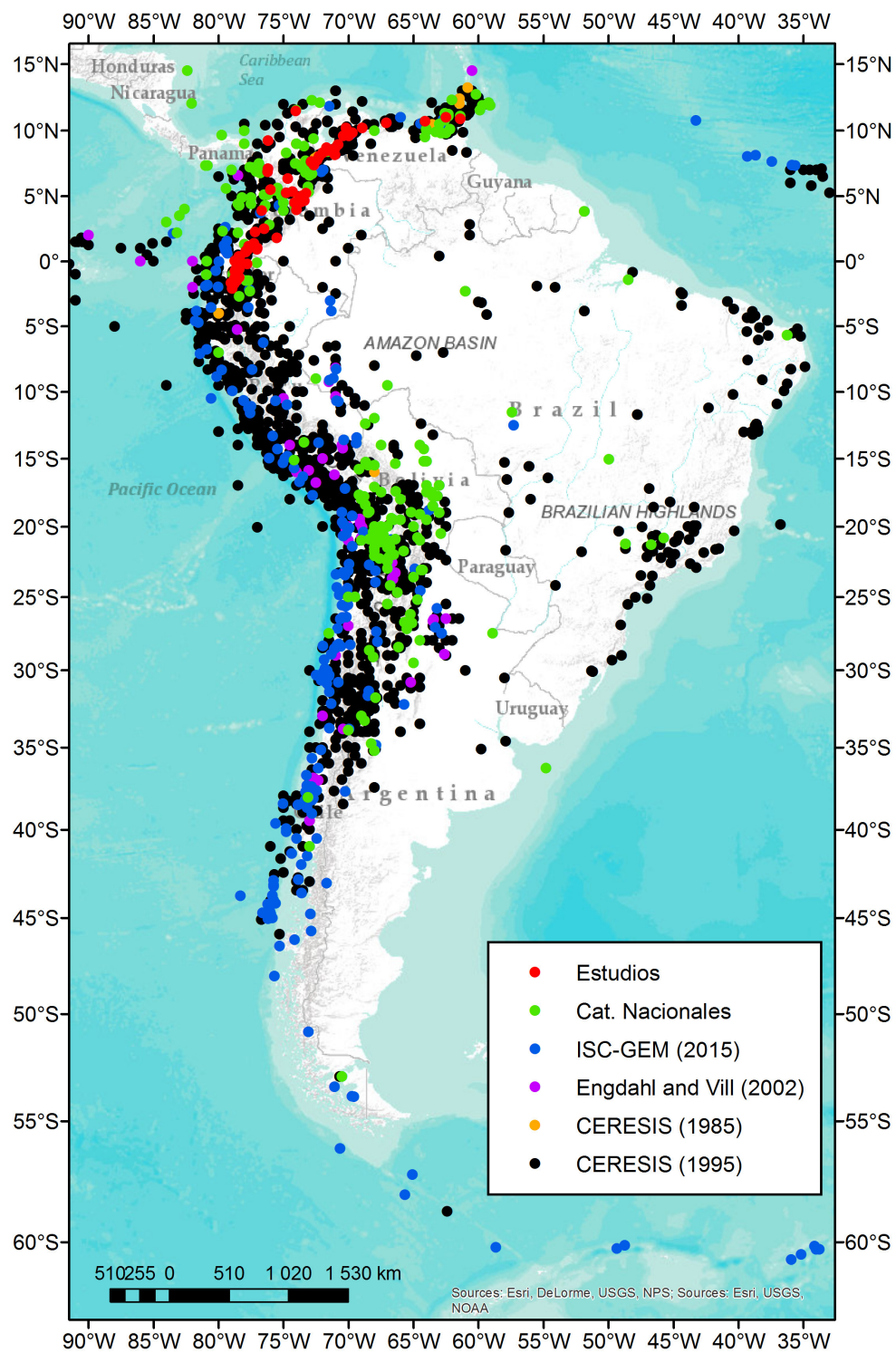


Figura 15. Distribución de epicentros por fuente de datos

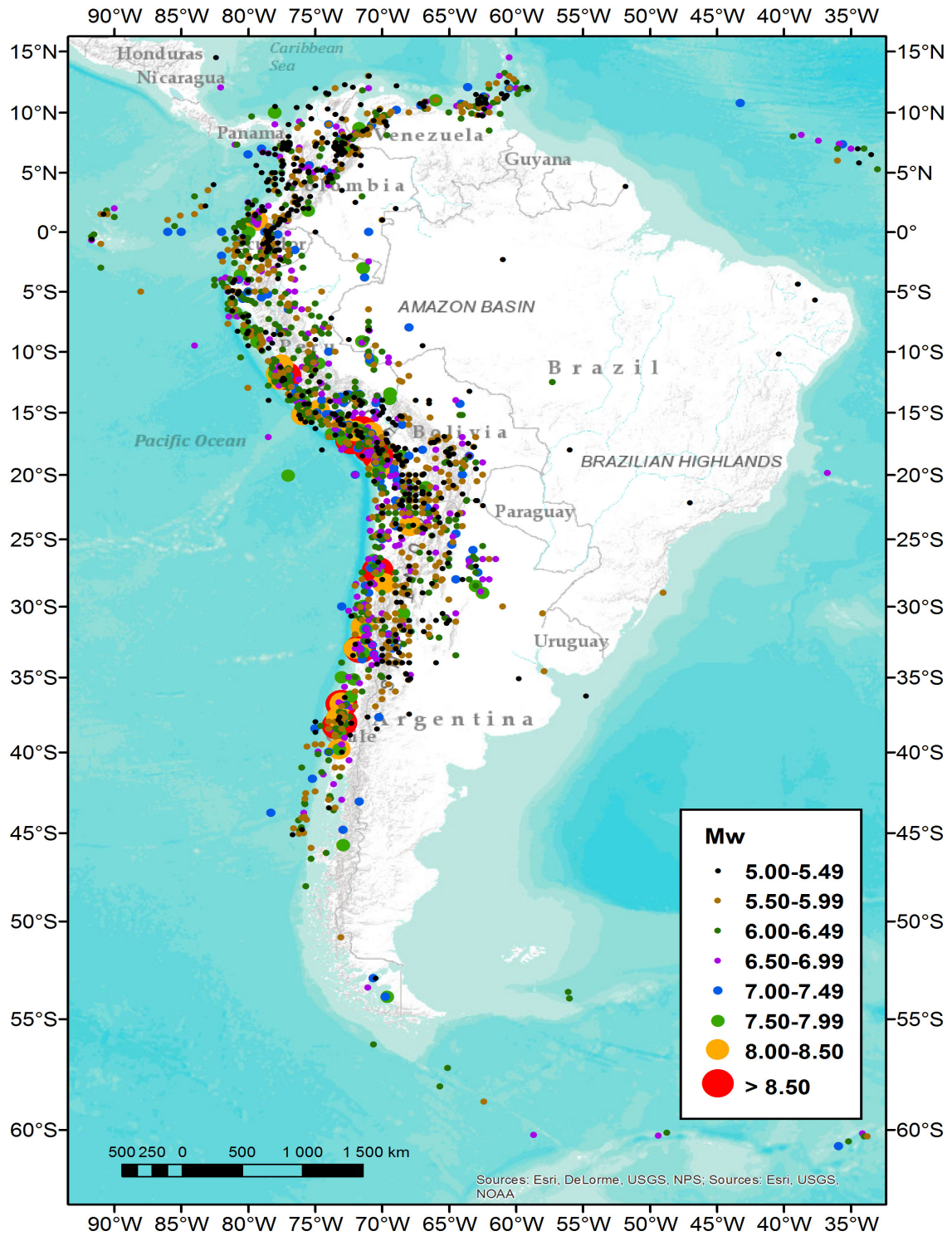


Figura 16. Distribución de epicentros por clases de Mw ($M_w \geq 5.0$)

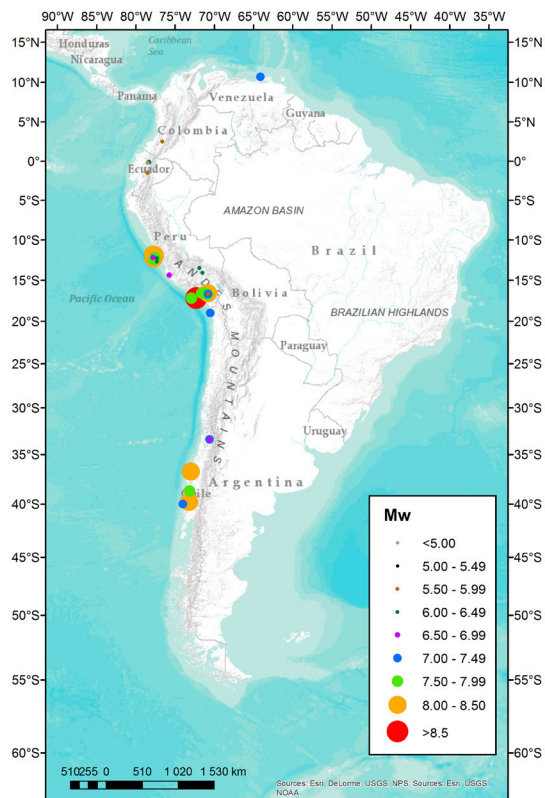


Figura 17a. 1500 - 1600

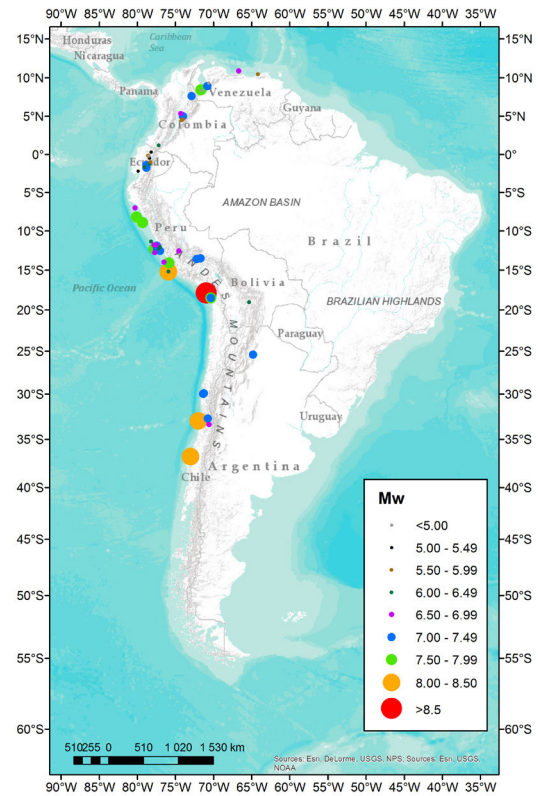


Figura 17b. 1601 - 1700

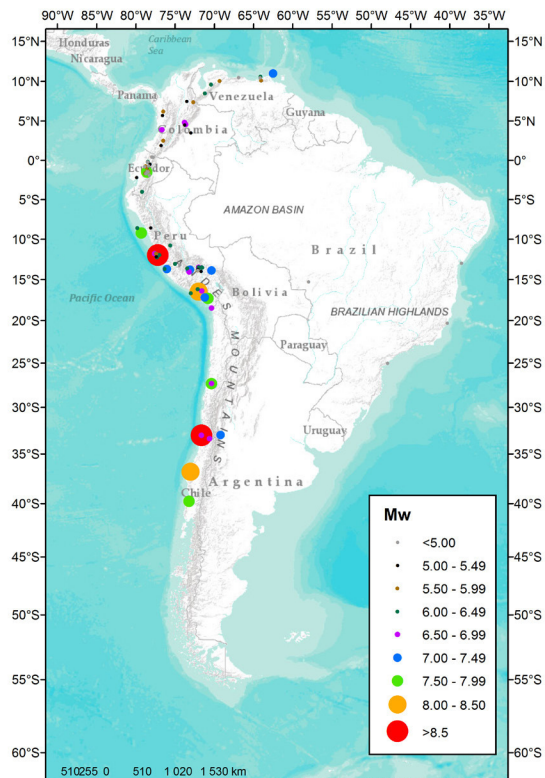


Figura 17c. 1701 - 1800

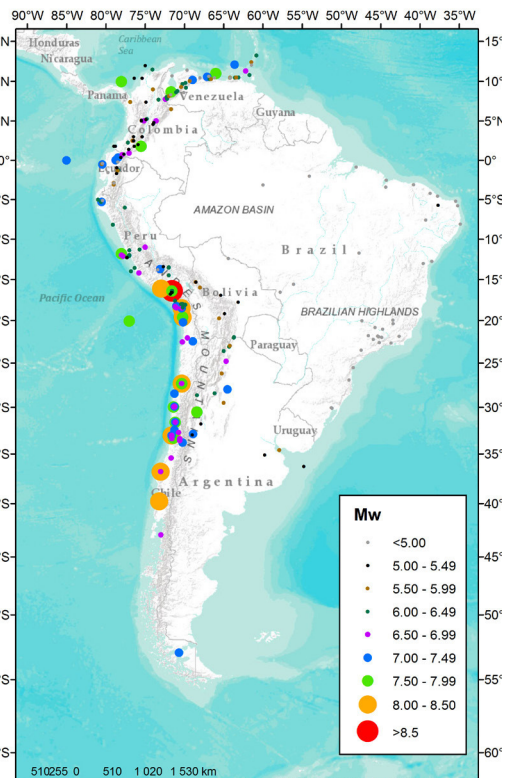


Figura 17d. 1801 - 1900

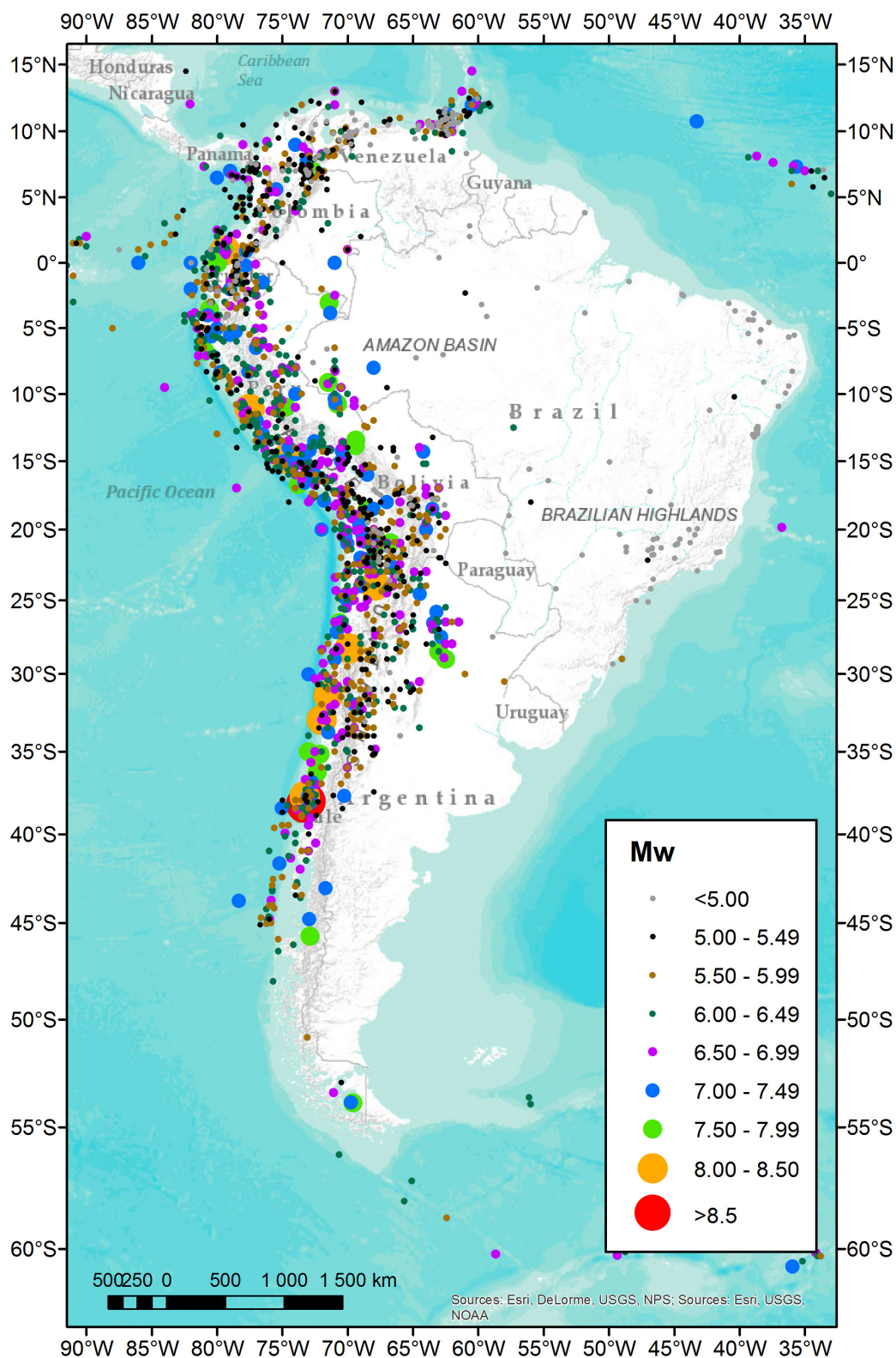


Figura 17d. 1901 - 1963)

Figura 17. Distribución de epicentros por clases de M_w ($M_w \geq 5.0$)

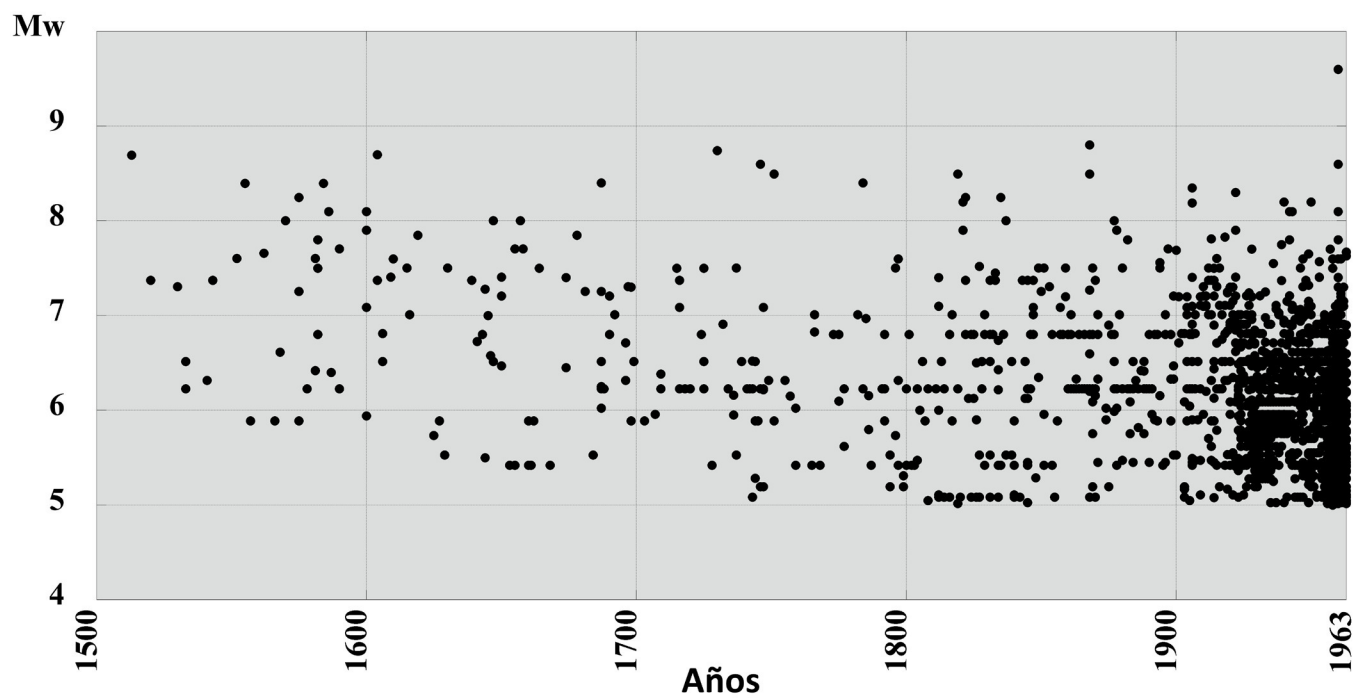


Figura 18 -Historia de terremotos antes de 1964 ($M_w \geq 5.0$) de América del Sur

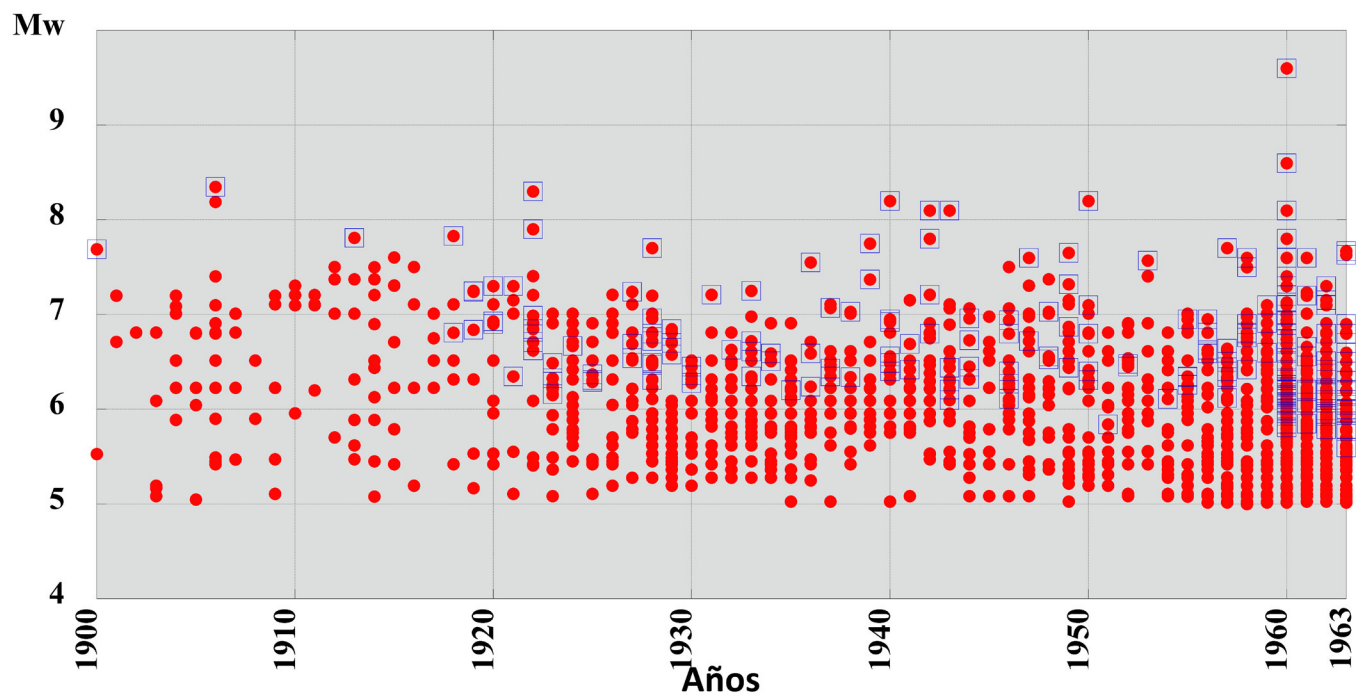


Figura 19 - Comparación del presente catálogo (círculos rojos) y del catálogo del ISC-GEM (1900-1963)

GEM (2015) para eventos entre 1900 y 1963. En tal comparación se observa una gran mejoría que el presente trabajo introduce en la cobertura de eventos históricos en América del Sur de inicios de 1900.

Aunque es asignada la magnitud M_w a 2556 terremotos, aún se encuentran 1766 eventos con un tamaño por debajo del umbral adoptado ($M_w < 5.0$), ya que para la mayoría de ellos el cálculo de la magnitud M_w usando las regresiones propuestas en la Tabla 10 no puede ser aplicado, pues están fuera del rango de confiabilidad.

Además, hay 227 eventos que no tienen de ningún tamaño es decir no tienen asignados en las fuentes de datos ningún tipo de magnitud, ni tampoco información de intensidad macrosísmica, significando capítulos abiertos en la investigación sobre sismología histórica en América del Sur.

El catálogo se encuentra disponible en línea en: https://sara.openquake.org/hazard_rt4

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la fundación "Global Earthquake Model" por promover y financiar la iniciativa del programa regional en el cual se desarrollo y actualizó el Catálogo de Terremotos para América del Sur (pre 1964) presentado en el presente artículo. Agradecimientos al "Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, sezione di Milano" y al Centro Regional de Sismología para América del Sur CERESIS por apoyar el presente trabajo. También queremos agradecer a los árbitros, Alejandra Núñez y Héctor González Huizar, por las sugerencias constructivas al desarrollo del presente artículo.

Bibliografía

- Abe, K., 1979. Size of Great Earthquakes of 1837-1974 inferred from tsunami data. *Journal of Geophysical Research*, 84, B4, 1561-1568.
- Abe, K., 1981. Magnitudes of large shallow earthquakes from 1904 to 1980. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 27, 72-92.
- Abe, K., and Noguchi, S., 1983. Determination of magnitude for large shallow earthquakes 1898-1917. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 32, 45-59.
- Albini, P., Musson, R.M.W., Rovida, A., Locati, M., Gómez-Capera, A.A., Viganó, D., 2014. The Global Earthquake History. *Earthquake Spectra*, 30, 2, 607-627, Earthquake Engineering Research Institute.
- Alvarado, P., and Beck, S., 2006. Source characterization of the San Juan (Argentina) crustal earthquakes of 15 January 1944 (M_w 7.0) and 11 June 1952 (M_w 6.8). *Earth and Planetary Science Letters* 243, 615-631.
- Alvarado, P., Barrientos, S., Saez, M., Astroza, M., Beck, S., 2009. Source study and tectonic implications of the historic 1958 Las Melosas crustal earthquake, Chile, compared to earthquake damage. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 175, 26-36.
- Assumpção, M., Ferreira, J., Barros, L., Bezerra, H., França, G.S., Barbosa, J.R., Menezes, E., Carlos Ribotta, L., Pirchiner, M., Nascimento, A., and Dourado, J.C., 2014. Intraplate seismicity in Brazil. In *Intraplate Earthquakes*, pages 50–71, Cambridge University Press, ISBN 9781139628921, <http://dx.doi.org/10.1017/CBO9781139628921.004>.

- Audemard, F.M., 1999. Nueva percepción de la sismicidad histórica del segmento en tierra de la Falla El Pilar, Venezuela Nororiental, a partir de primeros resultados paleosísmicos. Mem. VI Congreso Venez. Sismología e Ingeniería Sísmica (CD-ROM), Mérida, Venezuela.
- Bakun, W.H., and Wentworth, C.M., 1997. Estimating earthquake location and magnitude from seismic intensity data, Bull. Seismol. Soc. Am., 87, 1502–1521.
- Bakun, W.H., and Wentworth, C.M., 1999. Erratum to Estimating earthquake location and magnitude from seismic intensity data, Bull. Seism. Soc. Am., 89, 557.
- Beauval, C., Yepes, H., Bakun, W.H., Egred, J., Alvarado, A., and Singaicho, J.C., 2010. Locations and magnitudes of historical earthquake in the Sierra of Ecuador (1587-1996). Geoph. Journ. Intern., 181, 1613-1633.
- Beauval, C., Yepes, H., Palacios, P., Segovia, M., Alvarado, A., Font, Y., Aguilar, J., Troncoso, L., and Vaca, D., 2013. An Earthquake Catalog for Seismic Hazard Assessment in Ecuador. Bull. Seism. Soc. Am. 103, 2A, 773-786.
- Berrocal, J., Assumpção, M., Antezana, R., Dias Neto, C.M., Ortega, R., França, H., Veloso, J.A.V., 1984. Sismicidade do Brasil. Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo e Comissão Nacional de Energia Nuclear. Primeira edição. Composto na Editora Esperança, São Paulo, 320p.
- Catálogo Sísmico Brasileiro, 2012. <http://goo.gl/INTtVk> (<http://moho.iag.usp.br/rq/event>)
- CERESIS, Centro Regional de Sismología para América del Sur, 1985. Earthquake Mitigation Program in the Andean Region (SISRA Project), Lima, 14 vols.
- CERESIS, Centro Regional de Sismología para América del Sur, 1995. Catalogue for South America and the Caribbean.
- Choy, J.E., Palme, C., Guada, C., Morandi, M., and Klarica, S., 2010. Macroseismic Interpretation of the 1812 Earthquake in Venezuela Using Intensity Uncertainties and A Priori Fault-Strike Information, Bull. Seismol. Soc. Am., 100, 1, 241-255.
- Cisternas, M., 2012. El terremoto de Chile central de 1647 como un evento intra-placa. XIII Congreso Geológico Chileno, Antofagasta, Chile, Libro de Resúmenes, 1037-1039.
- Contreras Luarte, V.A., 2009. Curvas de atenuación espectrales para sismos chilenos. Memoria para optar el título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil, Santiago de Chile, 204p.
- Dimaté, C., Drake, L., Yepes, H., Ocola, L., Rendon, H., Grunthal, G., and Giardini, D., 1999. Seismic hazard assessment in the Northern Andes (Piloto Project). Annals of Geophysics, 42(6), 1039-1055.
- Dimaté, C., Rivera, L., and Cisternas, A. 2005. Re-visiting large historical earthquakes in the Colombian Eastern Cordillera, J. Seismol., 9, 1-22.
- Dorbath, A., Cisternas, A., and Dorbath, C., 1990. Assessment of the size of large and great historical earthquakes in Peru, Bull. Seism. Soc. Am., 80(3), 551-576.
- Dorel, J., 1981. Seismicity and seismic gap in the Lesser Antilles arc and earthquake hazard in Guadeloupe, Geophys. J. R. Astron. Soc., 67, 679–695.
- Ecuador, 2014. Catálogo de terremotos del Ecuador (archivo provisorio al task4), developed by Beauval et al. (2013).

- Egred, J., 2004. El terremoto de Riobamba del 4 de febrero de 1797. En *Investigaciones en Geociencias*, vol. 1, pp. 67-86, eds Alvarado A, García-Aristizabal A, Mothes P., Segovia M, IRD-Instituto Geofísico, Corporación Editora Nacional, Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, Ecuador.
- Engdahl, E.R., and Villaseñor, A., 2002. Global Seismicity: 1900–1999, In: W.H.K. Lee, H. Kanamori, P.C. Jennings, and C. Kisslinger (eds), *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*, Academic Press, Part A, Chapter 41, pp. 665–690. (Data from <http://earthquake.usgs.gov/data/centennial/>)
- Espinosa Baquero, A., 2003. *Historia Sísmica de Colombia*. Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad del Quindío, Bogotá, Colombia. CD-ROM.
- Espinosa Baquero, A., Gómez Capera, A.A., and Salcedo Hurtado, E. de J., 2004. State-of-the art of the Historical Seismology in Colombia. *Annals of Geophysics*, 47, 2/3, 437-449, ISSN: 2037-416X.
- FUNVISIS, 2014. Catálogo de terremotos de Venezuela, (in progress) archivo provisorio al task4.
- García, J., Weatherill, G., Pagani, M., Rodríguez M., Poggi V., and the SARA Hazard Working Group, 2017. Building an open seismic hazard model for South America: the SARA-PSHA model. In *Proceedings of the 16th World Conference on Earthquake Engineering*, Santiago, Chile, January 2017, paper n. 2154
- Gasperini, P., Bernardini, F., Valensise, G., and Boschi, E., 1999. Defining seismogenic sources from historical felt reports, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 89, 94–110.
- Gasperini, P., Vannucci, G., Tripone, D., and Boschi, E., 2010. The location and sizing of historical earthquakes using attenuation of macroseismic intensity with distance. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 100, 2035–2066.
- GEH, Global Earthquake History, 2013. The GEM Global Historical Earthquake Catalogue (1000-1903). <http://www.globalquakemodel.org/what/global-projects/historical-catalogue/>
- Giardini, D., 1999. The Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP)– 1992/1999. *Annals of Geophysics*, 42(6), 957-974.
- Giesecke, A., Gómez Capera, A.A., Leschiutta, I., Migliorini, E., and Rodríguez Valverde, L., 2004. The CERESIS earthquake catalogue and database of the Andean Region: Background, characteristics and examples of use. *Annals of Geophysics*, 47, 2/3, 421-435.
- Gómez-Capera, A.A., Cifuentes, H., Sarabia, A., Bindi, D., Choy, J., Galán, R., Pirchiner, M., Rodríguez, L.M., Sánchez, A., Salcedo Hurtado, E., 2014a. Parámetros del terremoto de Cúcuta del 1875 a partir de intensidades macrosísmicas. IASPEI-LASCS (Asamblea Regional Comisión Latinoamericana y del Caribe de Sismología) Regional Assembly 2014 July 23-25, Bogotá Colombia, Proc. in Earth. Sci. Res. J. Vol. 18 Special Issue, p. 199 (July. 2014).
- Gómez-Capera, A.A., Salcedo-Hurtado, E. de J., Bindi, D., Choy, J.E., García Peláez, J., 2014b. Localización y magnitud del terremoto del 1785 en Colombia a partir de intensidades macrosísmicas. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 38,147, 206-217.

- Gómez-Capera, A.A., Stucchi, M., with the collaboration of Arcila, M., Bufaliza, M., Choy, J., Leyton, L., Pirchiner, M., Rendon, H., Rodriguez Valverde, L., Sarabia, A.M., Tavera, H., and Yepes, H., 2016. The T4 working catalogue before 1964 of the SARA project. The South America Risk Assessment – SARA, Global Earthquake Model (GEM), 38p.
- Gómez-Capera, A.A., and Leschiutta, I., 2004. Determining the parameters of earthquake sources in South America from macroseismic intensity data (CERESIS database). Earth Sciences Research Journal, 8, 1, 10-18, ISSN. 1794-6190.
- Gutenberg, B. and Richter, C.F., 1956. Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration: (second paper). Bull. Seis. Soc. Am., 46-2, 105-145.
- INPRES, Instituto Nacional de Prevención Sísmica, 2015. Terremotos históricos de la República Argentina. <http://www.inpres.gov.ar/seismology/historicos.php>.
- Instituto Geofísico del Perú, 2015. Boletines sísmicos, <http://www.igp.gob.pe/portal/>
- ISC-GEM, 2015. V 2.0 of the ISC-GEM Catalogue, http://www.isc.ac.uk/iscgem/update_log/
- Kingland, J., Torres R.A., y Inglessis P., 2008. Ecuación de atenuación de intensidad macrosísmica y mapa de isosistas para el gran terremoto de los Andes de 1894. IMME, 46, 1, 1-22.
- Leyton, F., Ruiz, S., and Sepúlveda, A.A., 2009. Preliminary re-evaluation of probabilistic seismic hazard assessment in Chile: from Arica to Taitao Peninsula. Adv. Geosci., 22, 147-153.
- Lolli, B., Gasperini, P. and Vannucci G., 2014. Empirical conversion between teleseismic magnitudes (mb and Ms) and moment magnitude (Mw) at the Global, Euro-Mediterranean and Italian scale. Geophys. J. Int. (2014), 199, 805-828.
- Lomnitz, C., 2004. Major Earthquakes of Chile: A Historical Survey, 1535-1960. Seismological Research Letters, 75, 3, 368-378.
- Mocquet, A., 2007. Analysis and interpretation of the October 21, 1766 earthquake in the Southeastern Caribbean, J. Seismol., 11, 381-403.
- Observatorio San Calixto, 2013. Catálogo OSC revisado del 1650 al 2001 final, archivo provisorio al task4.
- Palme, C., Choy, J., y Guada, C., 2009. Wilhalm Sievers y el Terremoto del 29-oct-1900 reflexiones preliminares, V Jornadas Venezolanas de Sismología Histórica y VI Simposio Venezolano de Historia de las Geociencias, 25-28 de Junio, Mérida, 145-150.
- Palme de Osechas, C., Morandi, M., and Choy, J.E., 2005. Re-evaluación de las intensidades de los grandes sismos históricos de la región de la cordillera de Mérida utilizando el método de Bakun&Wentworth, Revista Geográfica Venezolana, número especial, 233-253.
- Red Sismológica Nacional de Colombia, 2015. Boletines de sismicidad, catálogo de sismicidad instrumental del Servicio Geológico Colombiano, <http://seisan.sgc.gov.co/RSNC/index.php/boletines-de-sismicidad>
- Rengifo, M., y Lafaille, J., 2000. Reevaluación del sismo del 28 de abril de 1894. Acta Científica Venezolana, 51, 160-175.

- Salcedo Hurtado, E. de J., y Castaño A.N., 2011. Reevaluación macrosísmica del terremoto del 12 de julio de 1785 en Colombia, *Boletín de Geología, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga*, 33, 2, 15-32.
- Salcedo Hurtado, E. de J., y Gómez-Capera, A.A., 2013. Estudio macrosísmico del terremoto del 18 octubre del 1743 en la región central de Colombia, *Boletín de Geología, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga* 35, 1, 111-313.
- Salcedo Hurtado, E. de J., Romero Vergara, M.D., Vallejo Chocué, M.A., 2007. Contribución al análisis macrosísmico del terremoto del 7 de junio de 1925: principales efectos en la ciudad de Cali. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 31, 379-394.
- Sarabia, A.M., y Cifuentes, H., 2011. Sismicidad Histórica de Colombia: Estudios macrosísmicos 1644-2008 (en línea), Bogotá. <http://sish.sgc.gov.co/visor/> (consulta 11.10 2019).
- Sarabia Gómez, A.M., Cifuentes Avendaño, H.G., y Robertson, K., 2010. Análisis histórico de los sismos ocurridos en 1785 y 1917 en el centro de Colombia, *Revista Colombiana de Geografía, Bogotá*, 19, 153-162.
- Scordilis, E.M., 2006. Empirical global relations converting M_s and m_b to moment magnitude, *J. Seismol*, 10, 225- 236.
- Servicio Geológico Colombiano, SGC, 2013. Sismicidad Histórica de Colombia. Disponible en: <http://sish.sgc.gov.co/visor/> (consulta 11.10 2019)
- Servicio Geológico Colombiano, SGC, 2014. Catálogo de terremotos de Colombia; archivo provisorio al task4.
- Sismicité historique de la France, Antilles-Guyane-Mer des Caraïbes, *SisFrance-Antilles*, 2015. histoire et caractéristiques des séismes ressentis aux Antilles françaises et dans l'archipel des Caraïbes, <http://www.sisfrance.net/Antilles/index.asp>
- Sismología Histórica de Venezuela, 2011. At the Universidad de Los Andes, <http://sismicidad.ciens.ula.ve/>
- Storchak, D.A., Di Giacomo, D., Bondár, I., Engdahl, E.R., Harris, J., Lee, W.H.K., Villaseñor, A., and Bormann, P., 2013. Public Release of the ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900-2009), *Seism. Res. Lett.*, 84(5), 810-815.
- Storchak, D.A., Di Giacomo, D., Bondár, I., Harris, J., Engdahl, E.R., Lee, W.H.K., Villaseñor, A., Bormann, P., and Ferrari, G., 2012. ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue (19009-2009), Final Scientific Report, 99p. Consulta: 2014.02.15, <http://www.globalquakemodel.org/what/seismic-hazard/instrumental-catalogue>.
- Tanner, J.G., and Shepherd, J.B., 1997. Seismic hazard in Latin America and the Caribbean, *Seismic Hazard in Latin America and the Caribbean*, vol. 1. Final Report to the International Development Research Centre, Ottawa, Canada, Instituto Panamericano de Geografia e Historia, Mexico, D.F., 142 pp.
- Tavera, H. ed. 2001. Catálogo Sísmico del Perú 1471–1982, Versión Revisada y Actualizada, Instituto Geofísico del Perú, Dirección de Sismología, Lima, 547p. At: <http://www.igp.gob.pe/> (consulta 14.12.2015).
- Tello, G., y Pérez, I. 2005. El Terremoto de 1894: Investigación Histórica. *INSUGEO, Serie Correlación Geológica*, 19, 23-40, Argentina.

Udías, A., Madariaga, R., Bufo, E., Muñoz, D., and Ros, M., 2012. The Large Chilean Historical Earthquakes of 1647, 1657, 1730, and 1751 from Contemporary Documents, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 102(4), 1639–1653.

Recibido: 2 de septiembre de 2019

Corregido por el autor: 17 de febrero de 2020

Aceptación: 23 de marzo de 2020

Características de las principales áreas sísmicas de Cuba

Mario Octavio Cotilla Rodríguez^{1*}, Diego Córdoba Barba¹, Leonardo Álvarez Gómez²

¹Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Físicas.

Departamento de Física de la Tierra y Astrofísica. Plaza de Ciencias 1. 28040, Madrid, España.

²Ministerio de Transporte e Infraestructuras.

Managua, Nicaragua

*macot@ucm.es

Resumen

Se presentan datos y argumentos que sustentan el conocimiento de las diez principales áreas sísmicamente más activas de Cuba. Para su delimitación se consideran varios elementos sismotectónicos. La base del trabajo incluye una revisión profunda de las publicaciones sobre la Provincia Sismotectónica y las cuatro Unidades que la componen. Su sismogénesis la determinan las interacciones entre las placas. Con ellas se configuran los sistemas de fallas, intersecciones y nudos, bloques y celdas geodinámicas. Se hace un diagnóstico de lugares con posibles afectaciones por terremotos fuertes y asegura que el peligro sísmico es de menor nivel que en países vecinos.

Palabras Claves: Cuba, peligro sísmico, terremoto, sismicidad.

Abstract

Some statistics and arguments that support understanding the ten main seismic regions of Cuba. Several seismotectonic factors are considered for their delimitation. This work is based on a detailed examination of the literature-based information on Seismotectonic Province and its Units. The seismogenesis is determined by the plate interactions, which are used to configure the faults, intersections, knots, blocks, and geodynamic cells systems. A diagnostic of locations with probable affectations from strong earthquakes indicates that the seismic hazard in the study area is smaller than in neighboring countries.

Keywords: Cuba, seismic hazard, earthquake, seismicity

Introducción

Cuba es un archipiélago localizado en la región del Caribe, pero desde el punto de vista tectónico, está en la placa de Norteamérica (Figura 1.1). Su actividad sísmica se documenta desde 1528 en la ciudad primada de Baracoa, en la costa nororiental. Con el poblamiento, sucesivo e ininterrumpido, desde el este de la Isla hacia el oeste (Tabla 1; Figura 1.2), los reportes aumentaron significativamente. Las primeras informaciones (siglos XV-XVIII) las emitieron mayoritariamente las autoridades españolas, por lo que se estableció que la región Suroriental no

era la única activa (Figura 2).

En Cuba, incluso actualmente, persiste la falsa creencia de que es únicamente la zona de Santiago de Cuba la que puede ser afectada por terremotos. Esto se debe principalmente a la baja frecuencia de terremotos fuertes y a la escasa educación en materia de peligro sísmico de la población. Por ello, los autores dedicamos este trabajo a proponer un nuevo modelo de áreas con mayor peligrosidad sísmica.

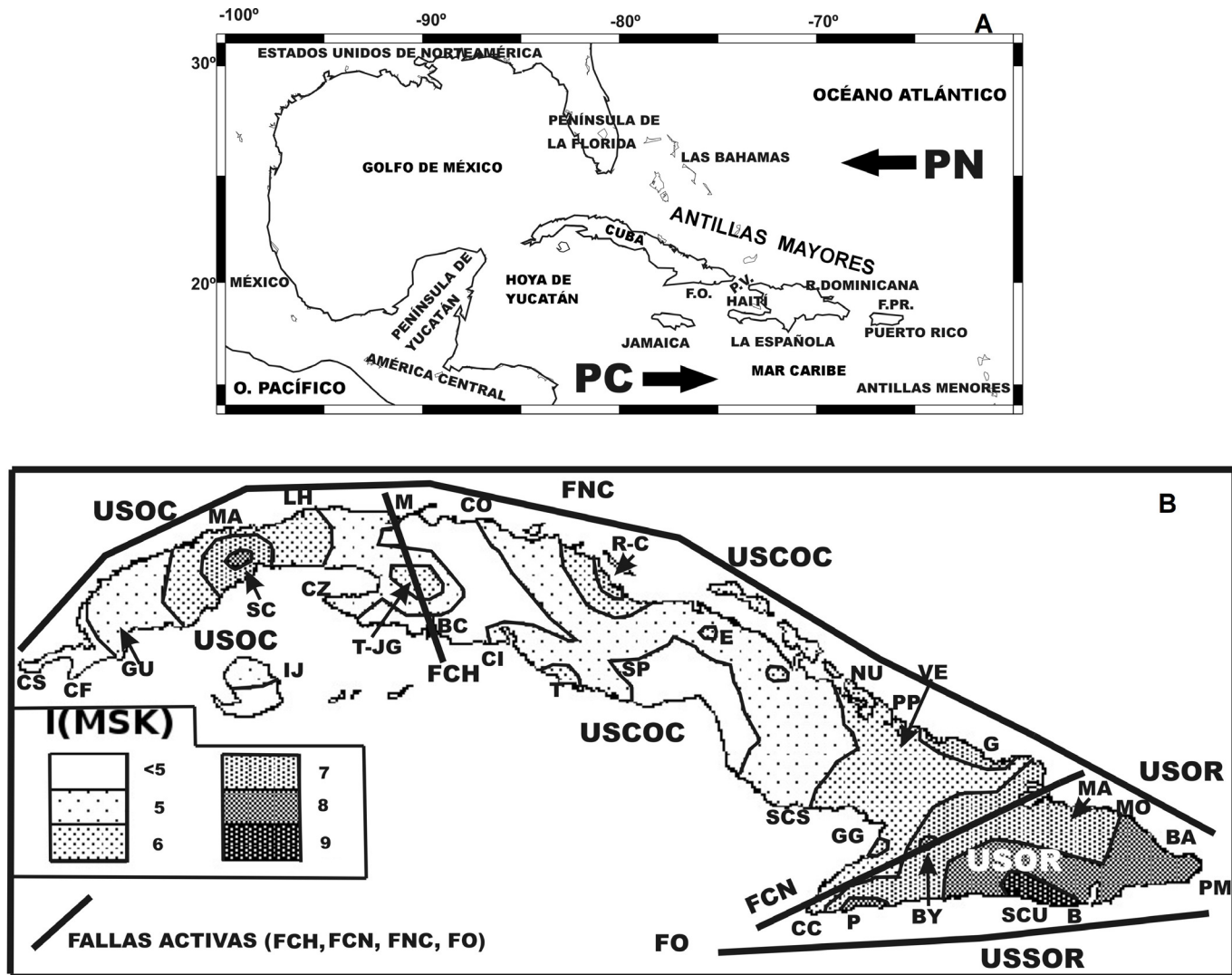


Figura 1. Cuba en el Caribe. A) Localización geográfica y tectónica. Abreviaturas: F.O.=Fosa Oriente, F.PR=Fosa Puerto Rico; P.V.=Paso de los Vientos; PC=Placa Caribe, PN=Placa Norteamérica. Las flechas negras gruesas indican dirección de movimiento.

B) Provincia Sismotectónica y sus Unidades. Abreviaturas: US=Unidad Sismotectónica, USOC=Occidental, USCOC=Centro Occidental, USOR=Oriental, USSOR= Suroriental. Las cuatro US están delimitadas por las fallas activas: FCH=Cochinos, FCN=Cauto-Nipe, FNC=Nortecubana, FO=Oriente. Localidades: B=Baconao, BA=Baracoa, BC=Bahía de Cochinos, BY=Bayamo, C=Cienfuegos, CC=Cabo Cruz, CO=Corralillo, CZ=Ciénaga de Zapata, E=Esmeralda, GI=Gibara, GU=Guane, IJ= Isla de la Juventud, LH=La Habana, M= Matanzas, MA= Mayarí, NU=Nuevititas, P= Pilón, PM=Punta de Maisí, R-C=Remedios-Caibarién, SCU=Santiago de Cuba, SC=San Cristóbal, SCS=Santa Cruz del Sur, SP=Sancti Spíritus, T=Trinidad, T-JG=Torriente-Jagüey Grande, VE=Velazco. El mapa de Intensidades Máximas reportadas en Cuba (1528-1990) es de Chuy-Rodríguez, 1999) con seis zonas de Intensidad (<5-9).

Tabla 1. Datos generales sobre algunas localidades de Cuba.

Nº	Localidad	Fundación/ Habitantes (10 ³)	Nº	Localidad	Fundación/ Habitantes (10 ³)
1	Bahía de Cochinos	1850/ 0.1	10	La Habana	1514/ 2,141.7
2	Baracoa	1511/ 79.8	11	Matanzas	1693/ 145.2
3	Bayamo	1513/ 238.58	12	Moa	1939/ 57.7
4	Cabo Cruz	1494/ 0.1	13	Pilón	1779/ 29.5
5	Caibarién	1832/ 38.5	14	Remedios	1513/ 45.6
6	Candelaria	1809/ 19.5	15	San Cristóbal	1830/ 29.1
7	Corralillo	1879/ 21.6	16	Sancti Spíritus	1514/ 141.0
8	Gibara	1817/ 71.1	17	Santiago de Cuba	1515/ 444.9
9	Guane	1878/ 35.7	18	Torriente	1687/ 7.3
10	Jagüey Grande	1840/87.8	19	Trinidad	1514/ 75.0

Nota: Población de Cuba en 2018 era de 11,338,138 (<https://datosmacro.expansion.com/demografia/poblacion/cuba>)

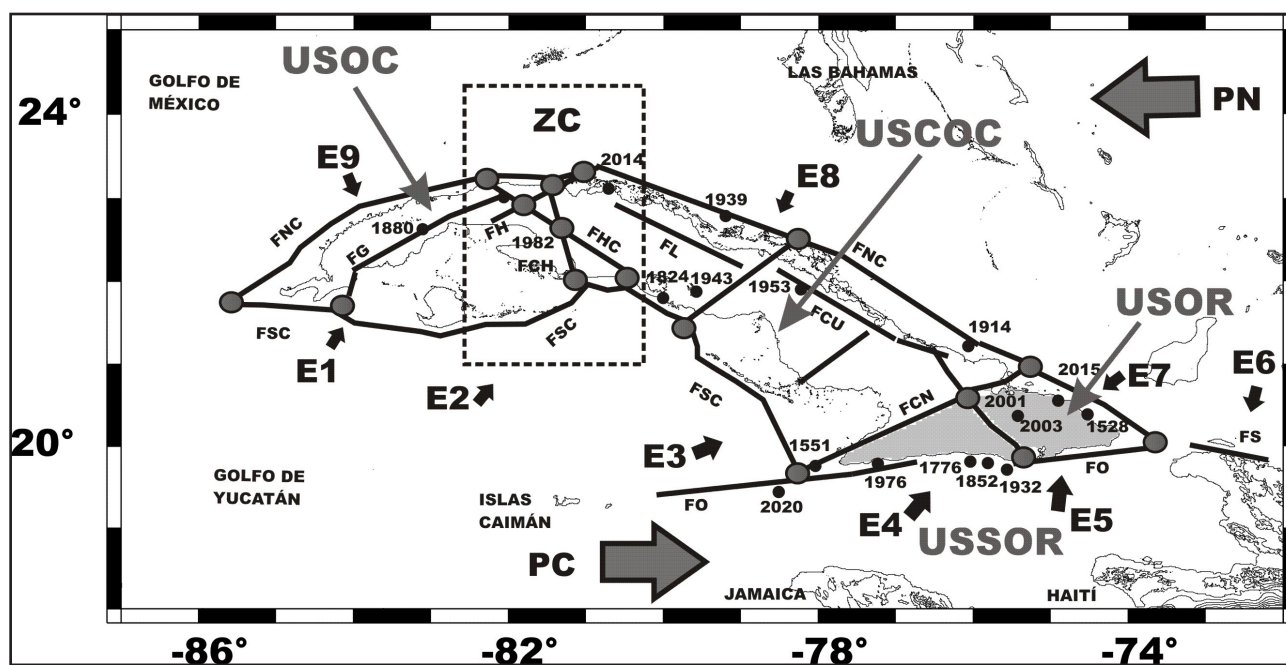


Figura 2. Mapa sismotectónico simplificado de Cuba. Fallas indicadas con líneas negras: FCU= Cubitas, FG=Guane. FH=Hicacos, FHC=Habana-Cienfuegos, FL=Las Villas, FS=Septentrional, FSC=Surcubana). Los epicentros son los círculos pequeños negros con año; El tensor $\sigma_{\text{máx}}$ se indica con la flecha negra pequeña y letra-número (E1-5). Las intersecciones o nudos son los círculos de color gris con borde negro. El sentido de movimiento de las placas PC=Caribe y PN=Norteamérica se indica con flechas gruesas de color gris. Las Unidades Sismotectónicas son: USOC=Occidental, USCOC=Centro-Occidental, USOR=Oriental, USSOR=Suroriental (siglas en gris) y ZC=Zona de cambio estructural en el rectángulo discontinuo.

Neotectónica

Para la preparación de este apartado se han empleado los trabajos de Cotilla (2014), Cotilla-Rodríguez (2017), Cotilla y Córdoba (2017, 2018), Cotilla *et al.*, (2007, 2020) y Mann y Burke (1984). Se considera que Cuba es una estructura insular del norte caribeño de 110,922 km², que en conjunto con otras islas vecinas se conocen como Arco de las Antillas Mayores (longitud de ~4.800 km) (Figura 1.1). Constituye un megabloque emergido y en ascenso diferencial entre sus partes que está incorporado tectónicamente al borde meridional de la placa Norteamérica. Las particularidades estructurales, complejas y heterogéneas, fueron adquiridas en dos etapas del desarrollo geológico: 1) orogenia cubana -Eoceno Medio-; 2) neotectónica -Post Eoceno Superior-, las cuales se caracterizan, por movimientos compresivos, transpresivos y verticales oscilatorios. Éstos son los responsables de la diferenciación y la división en bloques, y del desarrollo de una cobertura sedimentaria poco deformada que cubre, parcialmente, a las estructuras pre neotectónicas y que se reflejan en el relieve. La división se produjo a partir de los límites tectónicos de la etapa pre Eoceno Superior, como zonas favorables a rupturas, aunque con otro estilo y tendencia, principalmente vertical. La complejidad estructural se evidencia en los cortes geológicos e investigaciones geofísicas indican que se encuentran apiladas, mezcladas, desplazadas y dislocadas diferentemente en distintas zonas estructurales.

El megabloque cubano, en ocasiones denominado microplaca, se compone de un conjunto articulado de bloques, fallas, intersecciones de fallas, o nudos y celdas geodinámicas. En él sobresale el límite de las placas Caribe y Norteamérica, la falla Bartlett-Caimán, que en el sector Islas Caimán-sur de Cuba Oriental se conoce como falla Oriente. Éste es un límite tectónico activo de primer orden en la dimensión regional.

Sismicidad y sismotectónica

En el Caribe Septentrional la historia sísmica demuestra que: 1) la $M_{\text{máx}}$ estimada es 8.2; 2) han ocurrido: 2.1) ~100 terremotos fuertes; 2.2) 28 tsunamis locales; 3) se han producido ~106 fallecidos y cuantiosas pérdidas económicas. A modo de ejemplo, del peligro sísmico y real, se dan las siguientes cifras comparativas: 1) Los dos terremotos de 1907 en Jamaica produjeron ~2,000 muertos; el terremoto de 2010 de Haití ocasionó ~316,000 muertos y pérdidas estimadas por 14×10^9 USD (Cotilla, 2007, 2012; Cotilla-Córdoba, 2017, 2018). Esos valores son muy superiores a los determinados para Cuba por (Cotilla-Rodríguez, 1993; Cotilla 2010, 2014; Cotilla y Álvarez, 1997).

Cotilla (2012) realizó un análisis exhaustivo de la historia sísmica del Caribe Septentrional y determinó los datos mostrados en la Tabla 2. Ellos indican que Cuba tiene, en cifras, el menor peligro sísmico. De acuerdo con la Tabla 2.10 (Síntesis de la Sismicidad de Cuba para períodos de tiempo de 50 años e Intensidades MSK, periodo 1521-1990) de Chuy-Rodríguez (1999) se constató que de un total de 961 eventos, hay sólo 10 para el intervalo de 1521-1750 y en el periodo 1751-1990 son 951. Evidentemente se corresponde perfectamente con lo argumentado en la introducción respecto al sucesivo y sostenido poblamiento del archipiélago. Además, en la Tabla 2.4 (Cantidad de reportes de sismos perceptibles en la provincia Santiago de Cuba, de I= III a I= IX (escala MSK1978), para el mismo periodo y del mismo autor) hay 537 terremotos. Eso significa que 414 se asocian a la mayor parte del territorio cubano. La proporción o tasa superficie territorial/ años es de 0.17 en Santiago de Cuba y de 0.02 en el resto del archipiélago. Esto justifica la falsa creencia mencionada anteriormente.

Tabla 2. Datos de terremotos y tsunamis en la región.

	Cuba	Jamaica	Haití	República Dominicana	Puerto Rico	Total
Terremotos con $M \geq 7.0$	4	4	7	12	6	33
Tsunamis locales	2	8	11	3	4	28
La Española	Terremotos con $M \geq 7.0 = 19$			Tsunamis locales = 14		

Las zonas sismogénicas de Cuba (Figura 2) son áreas en general alargadas, donde descansan la concentración de epicentros, la mayor actividad sísmica con relación al entorno, y los esfuerzos, relativamente, uniformes y coherentes. Las zonas sismogénicas delimitadas por los autores, se basan en estudios de percepción remota, neotectónica, tectónica activa y datos contenidos en catálogos de terremotos históricos e instrumentales.

Los resultados de Álvarez *et al.* (1985, 1990, 1999, 1999a, 2015, 2017), Chuy (1989), Chuy-Rodríguez (1999), Cotilla (2007, 2010, 2012, 2014a, 2016, 2017), Cotilla y Álvarez (1997) y Cotilla y Córdoba (2010, 2018) permiten sostener que Cuba es una Provincia Sismotectónica del sur de la placa de Norteamérica. En ella los tipos de sismicidad bien definidos son de interior de placa Norteamericana y entre placas (Norteamérica-Caribe). El segundo tipo es el más importante y está localizado en la zona suroriental. En las tres Unidades Sismotectónicas (Occidental=USOC, Centro-Occidental=USCOC, y Oriental=USOR) de Cuba, está el primer tipo de sismicidad, que es de menor nivel en cuanto a frecuencia de ocurrencia y energía de los terremotos. La Unidad Sismotectónica Suroriental (USSOR), es la zona de contacto entre las placas en el sur de Cuba Oriental -Cabo Cruz y Punta de Maisí- (Figuras 1.2 y 2). Indicamos que la USOR, está definida entre tres líneas de fallas activas -Oriente, Nortecubana y Cauto-Nipe- como una estructura peculiar ya que tiene características de las otras unidades. Cotilla y Álvarez (1997) la denominaron como unidad de tipo intermedio y la incluyeron en la Zona Límite de Placas [ZLP] definida por Mann y Burke (1984) (Figura 3). Ésta es una extensa banda sismogénica que incluye los terremotos indicados en la Tabla 3.

La ausencia o escasas estaciones sísmicas permanentes en las USOC y USCOC, siempre ha limitado la detección de terremotos débiles. El CENAI (2020) opera actualmente 18 estaciones y asegura que tiene planeada la instalación de otras, pero aún quedan zonas sin cobertura (Cotilla *et al.*, 2020). En la Tabla 4 se han seleccionado cinco terremotos para ilustrar la actividad sísmica en las cuatro US. Hasta el momento ningún terremoto en Cuba ha tenido manifestaciones en la superficie. Dos de los muchos terremotos ocurridos en la USOR están en la Tabla 3. En esta US hay gran cantidad de terremotos de baja energía que son producto de la influencia de la transmisión de tensiones desde el límite de placas. Estos eventos son de interior de placa (Tablas 5 y 6).

En la Provincia Sismotectónica de Cuba las dos grandes zonas sísmicas se caracterizan a partir de 17 elementos propios de su actividad (Tabla 7). Otro rasgo notable es la distribución regular espacio-temporal de los principales terremotos en las USOC y USCOC (Tabla 8). De ellas se aprecia la muy diferente frecuencia de repetición entre terremotos fuertes que en la USOC es de ~100 años (sólo el terremoto de 1880; Cotilla, 2014); el tiempo en USCOC es de ~25 años (terremotos de 1914 y 1939; Cotilla, 2014). La falla Nortecubana es la responsable de la mayor actividad sísmica del interior de placa y la mayor $M_{\text{máx}}$ 6.2 registrada y determinada en la zona de interior de placa está en dos áreas diferentes y distantes ~800 km con un periodo de recurrencia de ~35 años (San Cristobal y Gibara).

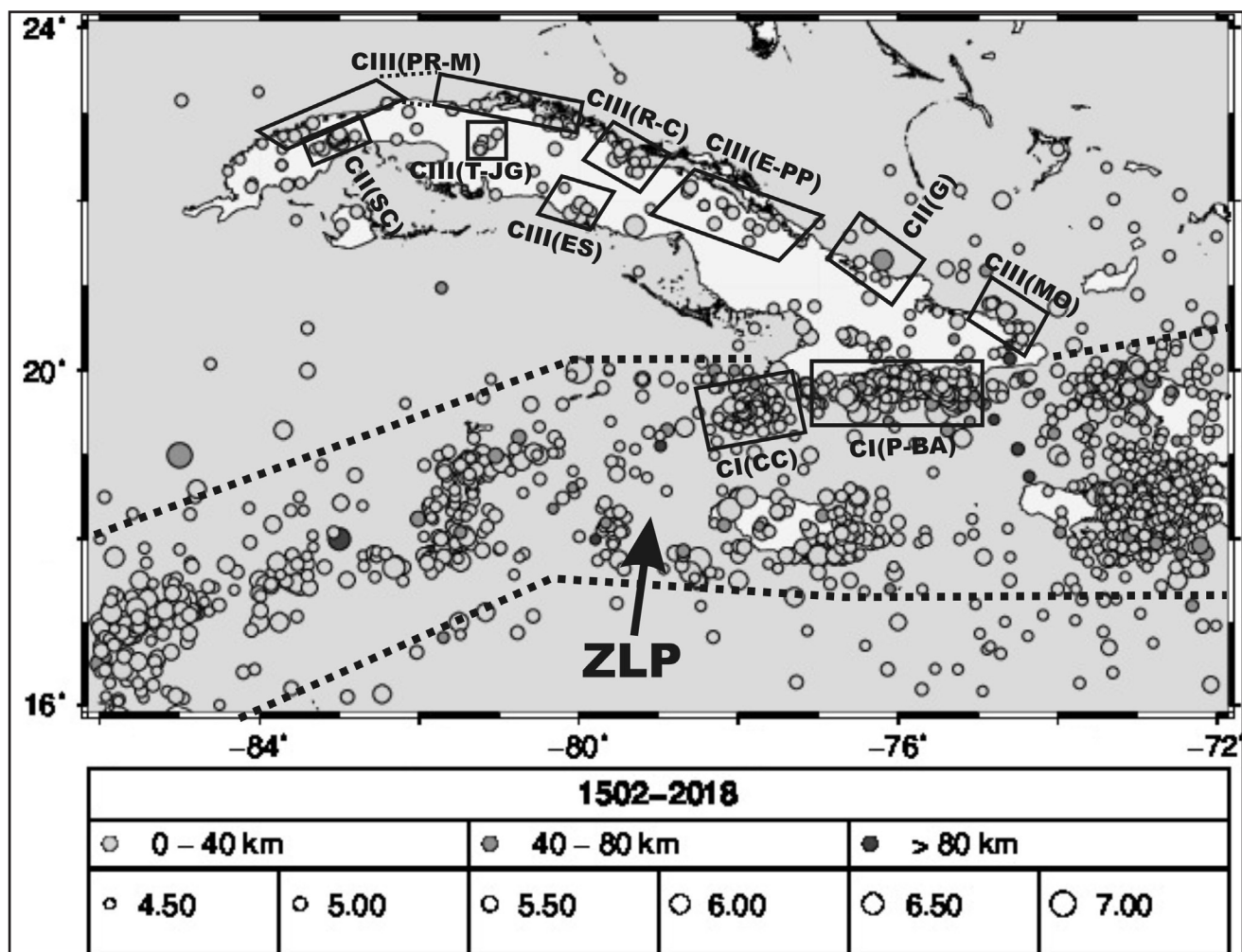


Figura 3. Mapa de las áreas sísmicas de Cuba. Aparecen: 1) epicentros de terremotos (CENAI, 2019); 2) áreas de actividad sísmica (rectángulos con siglas (ver Tablas 9-11)); 3) los trazos discontinuos delimitan la Zona Límite de Placas -ZLP-).

Tabla 3. Datos de dos terremotos perceptibles en la zona de interior de placa (USOR).

Fecha	M/ I/ h(km)	Coordenadas (N O)	Localizado	Perceptible	Isosistas
2003.10.13	4.6/ V/ 10	20,284 75,649	Mayarí	Si	Si
2001.11.19	4.2/ V/ 33	20,610 76,096	falla Cauto-Nipe	Si	Si

Tabla 4. Características de los principales terremotos de Cuba.

US	Terremoto más fuerte/ Tiempo	Mmáx/ Imáx/ h(km)	Coordenadas (N O)	Isosistas/ Perceptibilidad (10 ³ km ²)/ Índice de forma/ Réplicas	Pérdidas (10 ⁶ \$)	Fallecidos/ Heridos	Ruptura (km)	Tsunami local
OC	1880.01.23/ 4:30:00	6.2/ VIII/ 25	22.7 83.0	Si/ 40/ 0.68/ 65	1	3/ 20	35	No
COC	1914.02.28/ 3:21	6.2/ VII/ 50	21.30 76.20	Si/ 25/ 0.75/ 9	<0.01	-/ 2	15	No
OR	2003.10.13/	4.6/ V/ 33	20.284 75.649	Si/ 20/ 0.71/ 5	-	-	-	No
SOR	1766.06.11/ 00:00	7.2/ IX/ 30	19.9 76.1	Si/ 85/ 0.79/>60	10	40/ 700	80	No
	2020.01.28/ 19:10:24	7.7/ III/ 14.8	19.419 78.156	Si/ 25/ 0.83/>20	-	-	79	No

Notas: 1) US=Unidad Sismotectónica; 2) OC=Occidental, COC=Centro-Occidental, OR=Oriental, SOR=Suroriental; 3) Todas las intensidades sísmicas en el texto están en MSK (1978)]. Notas: 1) US=Unidad Sismotectónica; 2) OC=Occidental, COC=Centro-Occidental, OR=Oriental, SOR=Suroriental; 3) Todas las intensidades sísmicas en el texto están en MSK (1978)].

Tabla 5. Datos de los eventos más fuertes en las áreas de interior de placa (USOC y USCOC).

Fecha/ US	M/ I/ Réplicas	Coordenadas (N O)	Isosistas/ Epicentro en/ Tipo/ Índice de forma/ Área (10 ³ km ²)	Falla/ Ruptura (km)
1880.01.23/ OC	6.2/ 8/ 65	22.70 83.00	Si/ Tierra/ completa/ 0.68/ 40	G/ 35
1914.02.28/ COC	6.2/ 7/ 9	21.30 76.20	Si/ Mar/ media/ 0.75/ 25	NC/ 15
1939.08.15/ COC	5.6/ 7/ 24	22.50 79.25	Si/ Mar/ media/ 0.71/ 19	NC/ 20

Notas: 1) US=Unidad Sismotectónica; 2) OC=Occidental, COC=Centro-Occidental; 3) G=Guane, NC=Nortecubana.

Tabla 6. Resumen de terremotos asociados a la falla Nortecubana.

	Segmento [cantidad de eventos/ rango M/ rango h (km)]				
Terremotos	Occidental	Central	Oriental	Total/ Años	
Históricos	21/ 2.5-4.2/ 10-20	13/ 3.1-4.5/ 10-15	1/ 5.0/ 10	35/ 408	
Instrumentales	25/ 2.5-4.4/ 10-20	166/ 0.1-6.2/ 2-74	111/ 0.2-5.6/ 2-74	302/ 123	Tasa
Total	46	179	112	337/ 530	0.64

Tabla 7. Principales características de las grandes zonas sísmicas de Cuba.

		Sismicidad	
Nº	Características	Entreplacas	Interior de placa
1	Magnitud máxima/ Profundidad máxima (km)	7.7/ 60	6.2 / 25
2	Distancia máxima entre eventos fuertes (km)	100	825
3	Periodo de repetición (años)	~80	>100
4	Área máxima de afectación (km ²)	110.000	40.000
5	Distancia máxima de perceptibilidad (km)	~800	~300
6	Epicentro	Mar	Tierra y mar
7	Isosistas	Medias	Completas y medias
8	Intensidad máxima	IX	VIII
9	Estimado de la ruptura máxima (km)	85	58
10	Terremotos producidos (%)	~75	<25
11	Rangos de magnitud/ cantidad de terremotos	7.2-6.0/ 6; 5.9-5.0/ 18	6.2-6.0/ 2; 5.9-5.0/ 3
12	Cantidad de muertos	>100	~20
13	Categoría de las zonas sismogénicas	1	2-5
14	Cantidad de zonas sismogénicas lineales	1	12
15	Cantidad de intersecciones activas	3	14
16	Cantidad de celdas geodinámicas	1	10
17	Unidades Sismotectónicas	USSOR	USOC, USCOC, USOR

Nota:USSOR=Unidad Sismotectónica Suroriental, USOC=Unidad Sismotectónica Occidental, USCOC=Unidad Sismotectónica Centro-Occidental, USOR=Unidad Sismotectónica Oriental.

Tabla 8. Datos (espaciales y temporales) de los principales terremotos en las USOC y USCOC.

Sitio 1 (M)/ Sitio 2 (M)	Distancia (km)	Tiempo transcurrido (Años)	US
San Cristóbal (6.2)/ Gibara (6.2)	825	34	OC-COC
San Cristóbal (6.2)/ Remedios Caibarién (5.6)	400	59	OC-COC
San Cristóbal (6.2)/ Torriente Jagüey Grande (5.0)	200	102	OC-OC
Gibara (6.2)/ Remedios-Caibarién (5.6)	450	25	COC-COC
Gibara (6.2)/ Torriente-Jagüey Grande (5.0)	620	68	COC-OC
Remedios-Caibarién (5.6)/ Torriente-Jagüey Grande (5.0)	175	43	COC-OC

Notas: 1) US=Unidad Sismotectónica; 2) OC=Occidental, COC=Centro-Occidental.

Discusión

Los resultados de Armenian *et al.* (1997), Radulian *et al.* (2000), Witze (2010), Hall (2011) y Housemann (2018) centran la atención en los ambientes sismogénicos de interior de placa y entre placas para las ciudades grandes de Europa, similar a lo realizado para Cuba en este trabajo. Hay varios ejemplos de procedimientos específicos, para la identificación de la vulnerabilidad de las ciudades (Álvarez *et al.*, 1985, 1990; Real *et al.*, 1996; Ulomov, 1999; García-Pérez *et al.*, 2003; Maldonado-Rondón y Chio-Cho, 2005; Qaisar y Akhtar, 2005; Grünthal *et al.*, 2010).

Con esos datos y nuestros resultados se han identificado en Cuba diez áreas con sismicidad diferencial y significativa (Tablas 9, 10, 11 y Figura 3). Ellas son por orden alfabético: 1) Cabo Cruz, 2) Caibarién, 3) Escambray, 4) Esmeralda-Puerto Padre, 5) Gibara, 6) Moa, 7) N de Pinar del Río-N de Matanzas, 8) Pilón-Baconao, 9) Torriente-Jagüey Grande, 10) San Cristóbal. La separación en áreas mencionada es evidentemente una

aproximación muy económica a la microzonación sísmica.

Esas áreas están divididas en tres categorías (CI, CII, y CIII) (Figura 3) a partir de la localización tectónica del terremoto, la magnitud, la frecuencia de ocurrencia, la cantidad de fallecidos y la superficie afectada. Entre las áreas delimitadas están Cabo Cruz y Pilón-Baconao, las cuales son las zonas de mayor nivel energético de Cuba. Ellas están localizadas en el límite entre las placas y han afectado históricamente al suroriente de la Isla e incluso, significativamente, a la ciudad de Bayamo, en la zona interior. Los periodos de recurrencia estimados de estos eventos son <100 años. Se destaca que entre los rasgos distintivos de estas zonas, los eventos no producen tsunamis locales y que el sector de Cabo Cruz es una intersección (o nudo) de fallas (Oriente y Cauto-Nipe) y el de Pilón-Baconao es la falla Oriente (Figura 2).

El segmento este de la falla Oriente, Baconao-Punta de Maisí (Figura 2), también forma parte del límite de placas. Sin embargo, éste es de muy baja energía y las magnitudes de sus terremotos

Tabla 9. Características principales áreas sísmicas de Cuba (Parte A).

Nº	Área	US	Categoría US	Estruc- tura	Denominación de las fallas principales	Longitud (km)	Categoría fallas
1	Cabo Cruz	SOR	US	Nudo	Oriente/ Cauto-Nipe	700/ 240	1/2
2	Pilón-Baconao			Falla	Oriente	490	1
3	San Cristóbal	OC	III		Guane	280	2
4	Caibarién	COC			Nortecubana	270	
5	Gibara				290		
6	Esmeralda-Puerto Padre				Cubitas	135	4
7	N Pinar-N Matanzas	OC			Nortecubana	210	3
8	Torriente-Jagüey Grande	COC		Nudo	Cochinos/ Habana-Cienfuegos	200/ 250	
9	Escambray			Falla	Surcubana	100	
10	Moa	OR			Nortecubana	120	2

Notas: 1) US=Unidad Sismotectónica; 2) OC=Unidad Sismotectónica Occidental, COC=Unidad Sismotectónica Centro-Occidental, SOR=Unidad Sismotectónica Suroriental; OR=Oriental; 3) la numeración de las áreas se mantiene en las siguientes tablas.

Tabla 10. Características principales de las áreas sísmicas de Cuba (Parte B).

Nº	Terremotos	Actividad sísmica/ Réplicas/ Tsunami local	M/ I/ h(km)/ Fallecidos/ Heridos	Área (10 ³ km ²)
1	1551.10.18	Natural/ Si/ No	(6.6)/ IX/ 15/ -/ 7	4
2	1776.06.11		(7.2)/ IX/ 30/ 96/ 1,333	10
3	1880.01.28		(6.2)/ VIII/ 25/ 3/ 20	5
4	1939.08.15		(5.6)/ VII/ 20/ -/ 10	3
5	1914.02.28		6.2/ VII/ 50/ -/ 5	5
6	1953.01.01		4.3/ VI/ 15/ -/-	0.2
7	2014.01.09		5.0/ V/ 10/ -/ -	1
8	1982.12.16		5.0/ VI/ 20/ -/ 2	1
9	1943.07.30	Inducida/ Si/ No	(4.6)/ VI/ 15/ -/ -	0.3
10	2015.01.21		4.1/ V/ 16/ -/ -	0.5

Tabla 11. Características principales de las áreas sísmicas de Cuba (Parte C).

Nº	Frecuencia (años)	Terremotos similares	Zona de	Siglas (Figura 3)	Categoría
1	<100	5	Entre placas	CI (P-BA)	I
2		>20		CI (CC)	
3	>100	1	Interior de placa	CII (SC)	II
4		1		CIII (R-C)	III
5		1		CII (G)	II
6		3		CIII (E-PP)	III
7		5		CIII (MO)	
8		2		CIII (T-JG)	
9		3		CIII (ES)	
10		10		CIII (PR-M)	

Nota: CC=Cabo Cruz, E-PP=Esmeralda-Puerto Padre, ES=Escambray-Sancti Spiritus, G=Gibara, MO=Moa, P=Pilón-Baconao, PR-M=Pinar del Río-Matanzas, R-C=Remedios-Caibarién, SC=San Cristóbal, T-JG=Torriente-Jagüey Grande.

son ligeramente inferiores al segmento N de la falla Nortecubana. En el gran segmento Baconao-Punta de Maisí no se han producido tsunamis locales ni se han registrado fallecidos por terremotos. La intersección de las fallas Oriente y Nortecubana en Punta de Maisí conforma un nudo. A partir de él y hacia el este, donde está la falla Septentrional, en el norte de La Española, la magnitud de los terremotos es 8,0 y se producen tsunamis locales. Cotilla et al. (2020) discute la falta de relación sismogénica de esa estructura activa con las fallas de Cuba.

La interacción del mosaico de placas en la región del Caribe y la consiguiente transmisión de esfuerzos y deformaciones explican también la actividad sísmica en el interior de Cuba. Para estos casos, todos los terremotos son de menor energía y están localizados en la zona de interior de placa. Sin embargo, entre ellos destacan los eventos de M6.2 en 1880 en San Cristóbal y de 1914 en Gibara (Tablas 2 y 5; Figura 2). Éstos pueden considerarse como excepciones a la regla y los estimados del periodo de recurrencia superan los 100 años. Hasta la fecha no se ha producido ningún otro evento de magnitud igual. En la Tabla 8 hay algunos datos de interés que justifican la actividad de la zona de interior de placa en Cuba, relativa a la falla Nortecubana. De acuerdo con Cotilla (2014a) la tasa aproximada, determinada para los eventos/ años es 0.64. Este valor es inferior al propuesto para la zona límite de placas Cabo Cruz-Baconao de 0.84 donde se genera aproximadamente el 70 % de la sismicidad de Cuba. Esto, evidentemente, responde a su diferente sismogénesis. Este último valor es menor que el determinado para el N de La Española-Puerto Rico de 0.93.

Hay otros terremotos importantes en Cuba y que se han producido en la falla Nortecubana (Tablas 5 y 6; Figura 2), la cual causó el evento de Gibara en 1914 (M6.2), de Remedios-Caibarién en 1939 (M5.6) que generó un tsunami local (Tabla 5), de Moa en 2014 (M5.0) y de Corralillo en 2015 (M4.1) (Cotilla et al., 2020). Los tres terremotos se produjeron en igual cantidad de segmentos

de la falla Norte Cubana pero los dos primeros fueron de origen natural, mientras que el tercero pudo ser por la acción antrópica con trabajos geofísicos y de explotación de petróleo y gas. Esto implica que hay al menos cuatro segmentos de falla como se observa en la Figura 2.

La última área con actividad sísmica significativa en Cuba está en las localidades de Torriente-Jagüey Grande, en la provincia de Matanzas (Figuras 1 y 2). El terremoto del año 1982 indicó que la fuente sísmica es un nudo (Chuy et al., 1983) configurado por la intersección de las fallas Cochinos y Habana-Cienfuegos. Además, la complejidad regional y local se ve en las zonas de Corralillo y Torriente-Jagüey Grande ya que están localizadas en la denominada zona de cambio estructural de Cuba (Figura 2), donde se observa una significativa inflexión de las estructuras de NE a NO, en las inmediaciones del E de Pinar del Río-La Habana-Matanzas, la mayor cantidad de zonas de articulación (nudos) de Cuba.

Otros elementos de importancia que sirven como referencia para considerar posibles afectaciones son las valoraciones del terremoto (M, daños en edificaciones y afectación a la vida humana), del más importante al último más fuerte ocurrido según se muestra en la (Tabla 12), así como la frecuencia de ocurrencia.

Todos los resultados aquí utilizados permiten diagnosticar la ocurrencia de posibles afectaciones en las poblaciones de las áreas activas por un terremoto fuerte. En la Tabla 13 se presenta la cantidad de habitantes, permanentes y flotantes. Por consiguiente es factible centrar, primeramente, los estudios en esos entornos y preparar adecuadamente a sus pobladores ($\sim 2.10^6$ habitantes).

La elaboración de mapas con estimaciones cuantitativas y probabilísticas de la peligrosidad sísmica en Cuba la iniciaron Álvarez *et al.* (1985). Para ello se usó la intensidad, la aceleración pico o PGA y se aplicaron los espectros uniformes de peligro, o UHS (Álvarez *et al.*, 2017).

Tabla 12. Características de algunos terremotos en las áreas sísmicas.

Nº	Área	Más importante			Último más fuerte		
		Año	M/ I/ 10 ⁶ \$	Fallecidos/ Heridos	Año	M/ I/ 10 ⁶ \$	Fallecidos/ Heridos
1	Cabo Cruz	1551	(6.6)/ VIII/<0.01	-/ 7	2020	7.7/ V/<0.001	-/ 49
2	Pilón-Baconao	1766	(7.2)/ VII/ 10	40/ 700	1932	6.75/ IX/ 20	25/ 350
3	San Cristóbal	1880	(6.2)/ VIII/ 1	3/ 20	1937	4.5/ VI/ 0.001	-
4	Caibarién	1939	5.6/ VII/<0.01	-/ 10	1940	3.2/ IV/ -	-
5	Gibara	1914	6.2/ VII/<0.01	-/ 5	1916	3.6/ V/ -	-
6	Esmeralda-Puerto Padre	1953	3.9/ VI/ -	-	1974	3.7/ V/ -	-
7	N Pinar-N Matanzas	2000	5.0/ V/ -	-	2014	5.0/ V/ -	-
8	Torriente-Jagüey Grande	1982	5.0/ VII/ 0.001	-/ 2	2015	4.1/ VI/ -	-
9	Escambray	1943	(4.6)/ VI/ -	-	1985	3.3/ V/ -	-
10	Moa	1998	5.6/ V/ -	-	2015	5.1/ V/ -	-

Tabla 13. Algunas localidades que pueden ser afectadas en las áreas sísmicas.

Nº	Población/ Zona	Habitantes
1	Bayamo, Manzanillo, Niquero, Pilon/ Oriental y Suroriental	~281,000
2	Mar Verde, Palma Soriano, Pilon, Río Carpintero, Santiago de Cuba, Siboney/ Suroriental	~432,000
3	Artemisa, Consolación del Sur, Güira de Melena, La Habana, Los Palacios, San Cristóbal/ Occidental	~150,000
4	Caibarién, La Panchita, Placetas, Remedios, Sagua La Grande/ Norte y Centro	~90,000
5	Antilla, Banes, Gibara, Holguín, Puerto Padre/ Extremo Norte Central	~80,000
6	Esmeralda, Nuevitas, Puerto Padre, Velazco/ Norte Central	~75,000
7	Cárdenas, Colón, Corralillo, La Habana, Mariel, Matanzas, Varadero/ Occidental- Central	~1,000,000
8	Jagüey Grande, Jovellanos, Playa Girón, Playa Larga, Torriente/ Central y Sur	~58,000
9	Casilda, Topes de Collantes, Trinidad/ Sur Central	~78,000
10	Baracoa, Mayarí, Moa/ Norte Oriental	~134,000

Tabla 14. Áreas asísmicas de Cuba.

Nº	Área No Sísmica [Siglas]	Algunas localidades	US
1	Cabo de San Antonio-Ciénaga de Zapata [CSA-CZA]	Aguas Claras, Cabo de San Antonio, Cabo Francés, Ciénaga de Zapata, La Coloma, Isla de la Juventud, Punta Carraguao	OCC
2	E de Sancti Spíritus-Golfo de Guacanayabo [ESS-GG]	Cándido González, Guayabal, La Tomatera, Manantiales, Santa Cruz del Sur, Vertientes	COC

Nota: OCC=Occidental, COC=Centro-Occidental.

En la tabla 14 están las dos áreas asísmicas o de muy bajo nivel que describen bandas, en la zona sur de las USOC y USCOC. Ellas representan ~5 % del territorio, correlacionan con los cambios de dirección de los esfuerzos principales, E1-E3 y la mayor distancia de la falla Surcubana a la línea de costa (Figura 2).

Para finalizar, indicamos que el resultado de la Figura 2 mejora los mapas de regionalización sísmica como el de la Figura 1.2. Consideramos que las áreas de mayor peligro están mejor definidas. Por consiguiente es factible centrar, primeramente, los estudios en esos entornos y preparar a sus pobladores.

Conclusiones

La actividad sísmica natural de Cuba es el resultado de la influencia de las placas Norteamérica y Caribe. En la Provincia Sismotectónica predomina la sismicidad entre placas y de interior de placa. El primer tipo es el de mayor nivel y se asocia a la falla Oriente.

Cuba tiene diez áreas con actividad sísmica significativa diferencial: 1) natural en Cabo Cruz, Caibarién, Esmeralda-Puerto Padre, Escambray, Gibara, Moa, norte de Pinar del Río-norte de Matanzas, Pilón-Baconao, San Cristóbal, y Torriente-Jagüey Grande y 2) la potencialmente inducida por actividad antrópica en el norte de Pinar del Río-norte de Matanzas. Las áreas se dividen en tres categorías (CI, CII, y CIII) a partir de cinco elementos: localización tectónica del terremoto, magnitud, frecuencia de ocurrencia, cantidad de fallecidos, y superficie afectada.

Agradecimientos

Las figuras fueron realizadas por A. García. Muchos datos los recopiló S. Crespillo. Los fondos provienen principalmente del Proyecto KUK-AHPAN RTI2018-094827-B-C21. Se agradecen las indicaciones y sugerencias del revisor anónimo y editores científico y técnico.

Referencias

- Álvarez, L., Vaccari, F. y Panza, G.F., 1999, Deterministic seismic zoning of eastern Cuba, *Pure and Applied Geophysics*, 156, p. 469-486.
- Álvarez, L., Cotilla, M. y Chuy, T., 1990, Informe final del tema 430.03: Sismicidad de Cuba. IGA, Academia de Ciencias de Cuba, 400 pp.
- Álvarez, L., Lindholm, C. y Villalón, M., 2017, Seismic hazard for Cuba: A new approach, *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 107 n. 1, doi:10.1785/0120160074
- Álvarez, L., Villalón, M., Lindholm, C. y Moreno, B., 2015, Peligrosidad y riesgo sísmicos en Cuba y las regiones circundantes. Tarea 2: Peligrosidad sísmica, principios y herramientas, Informe Científico-Técnico del CENAI, 153 pp.

- Álvarez, L., Rubio, M., Chuy, T. y Cotilla, M., 1985, Informe final del tema de investigación 310.01: Estudio de la sismicidad de la región del Caribe y estimación preliminar de la peligrosidad sísmica en Cuba, IGA, Astronomía, Academia de Ciencias de Cuba, 2 Volúmenes.
- Álvarez, L., Chuy, T., García, J., Moreno, B., Álvarez, H., Blanco, M., Expósito, O, González, O. y Fernández, A.I., 1999a, An earthquake catalogue of Cuba and neighbouring areas, The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, Miramare-Trieste. Internal Report IC/IR/99/1, 60 pp.
- Armenian, H., Melkonian, A., Noji, E. y Hovanesian, A., 1997, Deaths and injuries due to the earthquake in Armenia: A cohort approach, International Journal Epidemiological Association, v. 46, n. 4, p. 806-813.
- Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas [CENAI], 2019, Catálogo de terremotos de la red de estaciones. Fondos del CENAI.
- CENAI, 2020, Estaciones sismológicas permanentes de Cuba www.cenai.cu
- Chuy, T., 1989, Isosistas de terremotos de Cuba. En: Nuevo Atlas Nacional de Cuba, Sección Características Geofísicas, II.3.2. Madrid.
- Chuy-Rodríguez, T.J., Macrosísmica de Cuba y su aplicación en los estimados de peligrosidad y microzonación sísmica, Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias Geofísicas, Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente de Cuba, Santiago de Cuba, 1999.
- Chuy, T., Vorobiova, E., González, B., Álvarez, L., Pérez, E., Cotilla, M. y Portuondo, O., 1983, El sismo del 16 de diciembre de 1982, Torriente-Jagüey Grande, Revista Investigaciones Sismológicas en Cuba, n. 3, 44 pp.
- Cotilla-Rodríguez, M.O., Una caracterización sismotectónica de Cuba, Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias, Academia de Ciencias de Cuba, 200 pp., 1993.
- Cotilla, M., 2007, Un recorrido por la Sismología de Cuba, Editorial Complutense. Universidad Complutense de Madrid 200 pp., ISBN: 97-8-47-491827.
- Cotilla, M., 2010, Cuban Seismology, Revista Historia de América, n. 143, p. 43-98.
- Cotilla, M., 2012, Historia sobre la Sismología del Caribe Septentrional, Revista Historia de América, n. 147, p. 111-154.
- Cotilla, M., 2014, Alternative interpretation for the active zones of Cuba, Geotectonics, v. 48, n. 6, p. 459-483.
- Cotilla, M., 2014a, Sismicidad de interior de placa en Cuba, Revista Geofísica, v. 64, p. 93-125.
- Cotilla, M., 2016, The Guane fault, western Cuba, Revista Geográfica de América Central, n. 57, 159-198.
- Cotilla-Rodríguez, M.O., 2017, Evaluation of recent intraplate seismic activity on Cochinos Bay, Cuba, Revista Geográfica de América Central, n. 58, p. 195-222.
- Cotilla, M. y Álvarez, L., 1997, Sismicidad de tipo intermedia en Cuba, Revista Geología Colombiana, n. 22, p. 35-40.
- Cotilla, M. y Córdoba, D., 2010, Study of the Cuban fractures, Geotectonics, v. 44, n. 2, p. 176-202.
- Cotilla, M. y Córdoba, D., 2017, Morphotectonic study of the Greater Antilles, Geotectonics, v. 51, n. 1, p. 89-104.
- Cotilla, M. y Córdoba, D., 2018, Some glimpses of the tsunamigenic potential of the Caribbean region. Google Books, 100 pp.

- Cotilla-Rodríguez, M.O., Córdoba-Barba, D. y Álvarez-Gómez, L., 2020, Nortecubana, la principal falla de interior de placa en Cuba, Google Books, 87 pp.
- Cotilla-Rodríguez, M.O., Franzke, H.J. y Córdoba-Barba, D., 2007, Seismicity and seismoactive faults of Cuba, *Russian Geology and Geophysics*, v. 48, p. 1-18.
- Hall, S.S., 2011, At fault? *Nature*, v. 477, p. 264-269, doi:10.1038/477264a
- García-Pérez, J., Castellanos, F. y Díaz, O., 2003, Optimum seismic zoning for multiple types of structures. *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, v. 32, n. 5, p. 711-730.
- Grünthal, G., Arvidsson, R. y Bosse, Ch., 2010, Earthquake model for the European-Mediterranean region for the purpose of GEM1. Scientific technical report STR10/04, 38 pp.
- Housemann, G.A. (2018). Why earthquakes threaten two major European cities: Istanbul and Bucharest. *European Review*, v. 26, n. 1, p. 30-49 doi.org/10.1017/S1062798717000448
- Maldonado-Rondón, E. y Chio-Cho, G., 2005, Identificación de las zonas sísmicamente más vulnerables en la Ciudad de Bucaramanga. *Ingenierías*, v. 4, n2, p. 99-115.
- Mann, P. y Burke, K., 1984, Neotectonics of the Caribbean, *Reviews of Geophysics and Space Physics*, v. 22, p. 309-362.
- Qaisar, A. y Akhtar, N.K., A critical review of the seismic hazard zoning of Peshawar and adjoining areas, *Journal of Earthquake Engineering*, v. 9, n. 5, 587-607 (2005) doi:10.1080/13632460509350558
- Radulian, M., Mandrescu, M., Panza, G.F., Popescu, E. y Utale, A., 2000, Characterization of seismogenic zones of Romania. *Pure and Applied Geophysics*, n. 157, p. 57-77.
- Real, Ch.R., DeLisle, M.J. y McCrink, T., 1996, Provisional seismic zoning for ground failures in portions of Los Angeles and Ventura counties following the 17 January 1994 Northridge earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 86, n. 1B, p. 5.262-5.269.
- Ulomov, V.I., 1999, Seismo-geodynamics and seismic zoning of North Eurasia, *Vulcanology and Seismology*, v. 4-5. p. 6-22 [in Russian].
- Witze, A., 2010, Two of the biggest US earthquake faults might be linked, *Nature*, 576, p. 191-192, doi:10.1038/d41586-019-03769-w

Manuscrito recibido: 16 de octubre de 2020

Recepción del manuscrito corregido: 08 de diciembre de 2020

Manuscrito aceptado: 02 de marzo de 2021

Detección de una tormenta severa ocurrida en Aguascalientes, para la aplicación en el pronóstico meteorológico mediante datos de GFS

María Elena Bravo^{1*}, María Virginia Mezo¹

¹Instituto Oceanográfico del Golfo y Mar Caribe, Armada de México.

Calle Xicoténcatl s/n Fracc. Faros C.P. 91700, edificio Venustiano Carranza, Veracruz, México.

*marielena.bravo.gasca@gmail.com

Resumen

Se documenta una tormenta considerada como “severa”, detectada mediante los datos del modelo GFS, la cual fue registrada el 19 de junio de 2018, alrededor de las 19 hrs local, provocando daños importantes a la población de Aguascalientes, Ags., un lugar en su mayoría con clima seco y semiseco. Aquí las lluvias son escasas y se presentan especialmente durante el verano, ocasionando que la detección de ese tipo de tormentas convectivas sea una tarea compleja que requiere de conocimientos teóricos de las técnicas actuales de pronóstico disponibles y de las herramientas para la detección temprana de estos eventos. Estos pueden llegar a gestarse rápidamente poniendo en riesgo a la población y a sus actividades económicas en cuestión de minutos, como en el caso de la tormenta analizada en este trabajo.

Se emplea la información del modelo GFS con la salida de las 12Z, con el propósito de evaluar: el pronóstico de precipitación acumulada en 24 horas, el pronóstico de precipitación trihoraria, el viento, la humedad relativa, los valores de temperatura, temperatura potencial equivalente, así como la configuración de la convergencia, divergencia y ascensos ageostróficos en el transcurso del día del evento. Además, se analizaron los valores del contenido de agua precipitable mostrados en el modelo y se compararon con el valor mostrado en el sondeo de Guadalupe, Zacatecas, correspondiente a las 12Z. Para verificar el desempeño de la salida del modelo con respecto a la evolución de la tormenta, se emplearon imágenes satelitales del Servicio Meteorológico Nacional en canal infrarrojo, visible y vapor de agua, registros del CIMSS e información de los reportes METAR.

El resultado del análisis individual de las variables meteorológicas, para la detección de la tormenta severa en Aguascalientes mediante los datos del modelo GFS, representó una buena aproximación de las condiciones reales del evento, lo que permitió detectar a la tormenta severa registrada en la ciudad con antelación. Sin embargo, el pronóstico de la precipitación acumulada en tres horas fue menor a 20 mm, subestimando la precipitación de 56.2 mm registrada en menos de una hora, por lo que se demuestra la utilidad del análisis individual de las variables meteorológicas mediante el modelo, utilizando un método de pronóstico ordenado.

Palabras Claves: Tormenta severa, modelo GFS, pronóstico meteorológico.

Abstract

A storm considered as “severe” is documented. It was detected by the data of the GFS model, registered on June 19, 2018 around 19:00 local time, causing significant damage to the population in Aguascalientes city. This area has a dry and semi-dry climate, where rains are scarce and occur especially during the summer, causing that the detection of this type of convective storms is a complex task, which requires theoretical knowledge, current forecasting techniques available and of the tools that reinforce the early detection of these events. They quickly develop, putting the population and their economic activities at risk in a matter of minutes, as in the case of the storm analyzed in this paper.

The information from the GFS model is used with the 12Z output, in order to evaluate the accumulated precipitation forecast in 24 hours, the tri-hour precipitation forecast, wind, relative humidity, temperature values, equivalent potential temperature, as well as the configuration of the convergence, divergence and ageostrophic ascents during the day of the event. In addition, the values of the precipitable water content shown in the model were analyzed and compared with the value shown in the Guadalupe sounding in Zacatecas, corresponding to 12Z. To verify the performance of the model output with respect to the evolution of the storm, satellite images were used in infrared, visible and water vapor channels, CIMSS records and information from METAR reports.

The result of the individual analysis of the meteorological variables for the detection of the severe storm in Aguascalientes, through the data of the GFS model, represented a good approximation to the real conditions of the event, which allowed to detect the severe storm registered in the city in advance. However, the forecast of accumulated precipitation in three hours was less than 20 mm, underestimating the 56.2 mm precipitation recorded in less than one hour, but demonstrating the usefulness of individual analysis of meteorological variables through the model, using an ordered forecasting method.

Keywords: Severe storm, GFS model, Weather forecasting.

Introducción

De acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial (OMM), una tormenta se refiere a una o más descargas repentinas de electricidad que se manifiestan a través de relámpagos y truenos, sin embargo, cuando a este tipo de fenómenos hidrometeorológicos se le asocian daños materiales importantes, muertes o ambos, se convierte en una tormenta severa (Prieto et al., 2010).

Actualmente existen varias definiciones acerca de lo que significa este término y que pueden considerarse como oficiales, entre las cuales destacan las del Servicio Meteorológico Nacional de Estados Unidos (NWS, por sus siglas en inglés), el cual la define como aquella que es capaz de producir tornados, vientos de 25.7 m/s o más o granizo de un diámetro mínimo de 25 mm y la de la OMM, misma que la describe como aquella que es capaz de producir condiciones atmosféricas peligrosas que producen al menos uno de los siguientes eventos: vientos de 25 m/s o más, granizo de 25 mm de diámetro o más, lluvias de 50 mm o más por hora y la presencia de tornados o trombas marinas. Sin embargo, estas definiciones no deben ser aplicadas directamente en la determinación del pronóstico meteorológico

para todas las regiones que comprenden a la República Mexicana. Por el contrario, deben determinarse aquellas condiciones atmosféricas que, en combinación con las características fisiográficas de la zona, deriven en una tormenta susceptible de considerarse como una tormenta severa, (Mezo, 2020).

Actualmente, la Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional de México (CGSMN) como organismo oficial encargado de proporcionar información sobre el estado del tiempo a nivel nacional, diariamente informa a la población mediante la emisión de avisos y boletines acerca de las condiciones del tiempo. Ellos ofrecen, entre muchos otros, los pronósticos de precipitación y que a lo largo de las horas y dependiendo de los sistemas que las producen, pueden llegar a convertirse en eventos que pongan en riesgo a la población y que azoten puntualmente a una zona específica, derivado en gran medida de las características locales, convirtiéndose de esta manera en una tormenta severa. Así pues, es recomendable la investigación continua a escala local para identificar el posible desarrollo de una tormenta severa y continuar proporcionando a la población información confiable, útil y oportuna, contribuyendo a una adecuada prevención y toma de decisiones.

La presente investigación considera lo anterior y toma en cuenta el análisis de las variables meteorológicas y su evolución del día 19 de junio de 2018, en la ciudad de Aguascalientes, Ags., así como las características orográficas de la misma. Su efecto combinado generó una precipitación de 65.4 mm acumulados y registrados en 24 horas que corresponden al 81.14 % del acumulado de la precipitación normal en el mes de junio, de acuerdo a la climatología de la CGSMN del periodo 1981-2010 de Aguascalientes (Figura 1). Esta tormenta, catalogada como severa, se presentó en horas de la tarde y noche, provocó cortes de energía eléctrica en la zona centro, inundaciones, afectaciones a personas, vehículos, árboles y contenedores de basura pesados arrastrados por la corriente del agua, así como anegaciones y encharcamientos importantes en varios puntos de la ciudad. Fué necesario habilitar albergues temporales y se mantuvo el monitoreo y desfogue de La Presa de los Gringos como medida preventiva.

Dicho evento, fue pronosticado asertivamente por el sistema de predicción global (GFS, por sus siglas en inglés) con un rango de entre 50-75 mm

acumulados en 24 horas (lluvia muy fuerte), sin embargo, el modelo a través de los acumulados trihorarios de precipitación, subestimó la lluvia registrada de 56.2 mm registrados en tan sólo una hora, pronosticando valores que no rebasaron los 20 mm de lluvia tres horas antes y tres horas después del evento. Por ello, el objetivo principal de este trabajo es evaluar la eficiencia de la aplicación del “Método del Embudo”, así como de la temperatura potencial equivalente en combinación con el contenido de agua precipitable, para la identificación del desarrollo de la tormenta en el tiempo, mediante los datos de la salida del modelo GFS, comparando los resultados con información real del evento registrado.

Para la realización de esta investigación, además de los datos del modelo GFS, se utilizaron para la evaluación de los resultados las imágenes satelitales en la banda de vapor de agua, infrarrojo y visible e información oficial de la CGSMN que incluye avisos emitidos y registros de lluvia correspondientes al día del evento, así como los sondeos de la estación 76526 correspondientes a la estación en Zacatecas.

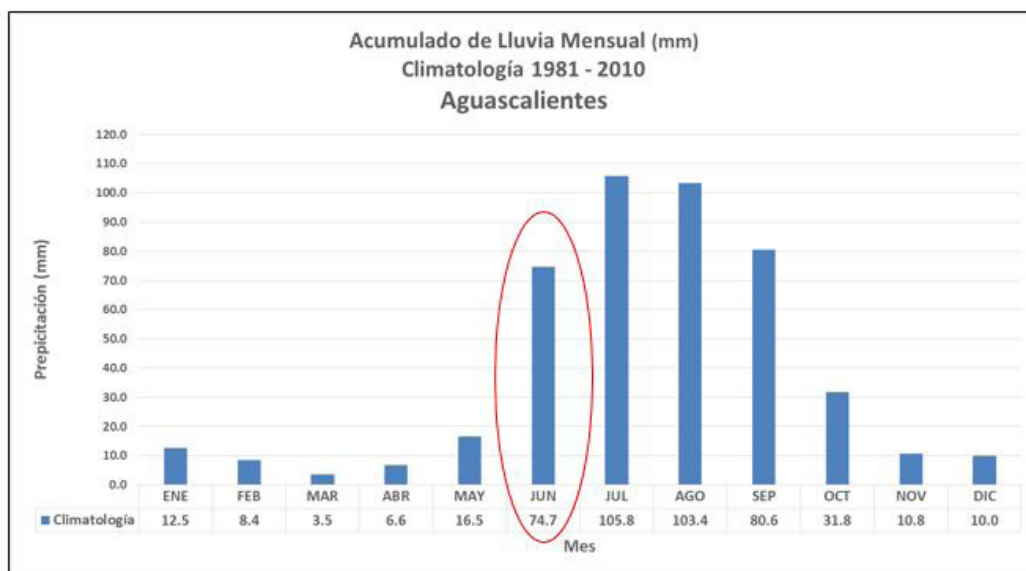


Figura 1. Precipitación normal para Aguascalientes. Latitud: 21°51'01" N y longitud: 102°17'27" W a 1890.8 msnm.

Metodología

Este análisis se desarrolló para el municipio de Aguascalientes, Ags., entre 21° 37' y 22° 01' latitud norte y 101° 52' y 102° 35' longitud oeste. Se sabe que las lluvias que se registran en el municipio son escasas y se producen principalmente durante la época de verano. La precipitación total anual es de 465.1 mm y la temperatura media anual es de 18.4°C, (climatología 1981-2010 del SMN). Con respecto a la orografía de la zona de estudio, la superficie estatal forma parte de la Sierra Madre Occidental, la Mesa Central y el Eje Neovolcánico, representando apenas el 0.3% del territorio nacional. La máxima elevación es la Sierra Fría con 3050 msnm y la altura a la que se encuentra la capital del Estado es de 1870 msnm, (INEGI, 2013).

Las imágenes satelitales del GOES-16 utilizadas para el análisis del evento contemplan a la ciudad, mismas que corresponden al canal infrarrojo, vapor de agua y a la banda visible en composición RGB ("color natural") del día 19 de junio de 2018, de las 6 horas hasta las 3 horas del día siguiente. Por otro lado, se utilizaron los datos del Sistema de Pronóstico Global (GFS, por sus siglas en inglés) para el día en cuestión, el cual es un modelo de pronóstico del tiempo generado por el Centro Nacional de Predicción Ambiental (NCEP, por sus siglas en inglés) y que es utilizado por pronosticadores operativos hasta con una ventana de 16 días en el futuro. Este conjunto de datos contiene docenas de variables atmosféricas y terrestres y se ejecuta cuatro veces al día (00z, 06z, 12z y 18z) con un alcance de 192 horas. La salida utilizada corresponde a las 12Z (debido a la asimilación de datos registrados por diversas fuentes de medición en tiempo real) de los días 18 y 19 de junio de 2018.

Así mismo, se revisó el conjunto de imágenes de convergencia, divergencia, cizalladura, vorticidad relativa en 850 hpa, viento en niveles bajos y viento en niveles medios y altos tomados del Instituto Cooperativo de Estudios Meteorológicos por Satélite (CIMSS, por sus siglas en inglés), las

cartas de superficie y niveles mandatorios del Servicio a la Navegación en el Espacio Aéreo Mexicano (SENEAM) y los reportes del informe de aeródromo meteorológico (METAR, por sus siglas en inglés) del Servicio Meteorológico Nacional de Estados Unidos.

El método utilizado para el análisis de los datos es el Método del Embudo (Figura 2), que es el mismo que se recomienda para realizar pronóstico meteorológico operativo de una forma ordenada y respetando el contenido de una lista de control, de acuerdo a Mr. Mike Davison, Director del International Desks del Weather Prediction Center de la NOAA en E.U.A. Este método es una técnica de pronóstico que respeta los fundamentos científicos de la dinámica de la atmósfera, a través de un proceso sistematizado, considerando el análisis de la divergencia en altura, convergencia en niveles bajos, la estabilidad de la columna, los indicadores de tiempo severo, el tipo de convección esperada, el contenido de agua y el mecanismo de disparo de la convección (Rojas, 2020). La importancia de este método, radica en que en un centro de análisis y pronóstico, los meteorólogos operativos independientemente del nivel de su experiencia, puedan llegar a conclusiones similares, a través de un proceso común al evaluar las variables atmosféricas.

Resultados

Modelo GFS salida de las 12Z

Los cortes verticales generados a partir de los datos del modelo GFS, con la salida de las 12Z para la ciudad de Aguascalientes, mostraron el acoplamiento en la columna atmosférica de la dinámica que generó la circulación ascendente en la región de estudio. Se observó la señal bien definida a partir de las 17 hrs, sin embargo, la convergencia reflejada en nivel de superficie a 700 hpa, se mantuvo en fase con la divergencia reflejada hasta 150 hpa a las 19 hrs (Figura 3). La misma condición se vio reforzada por ascensos

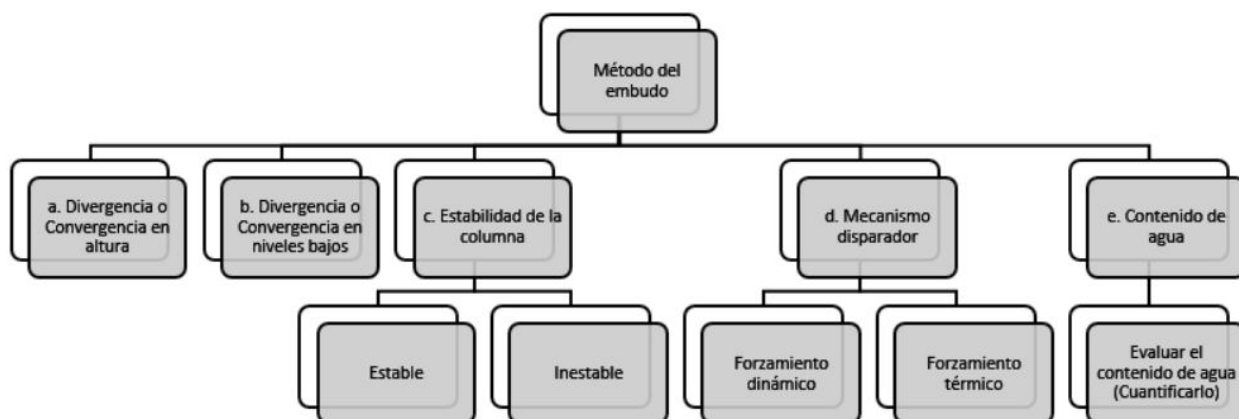


Figura 2. Representación del Método del Embudo.

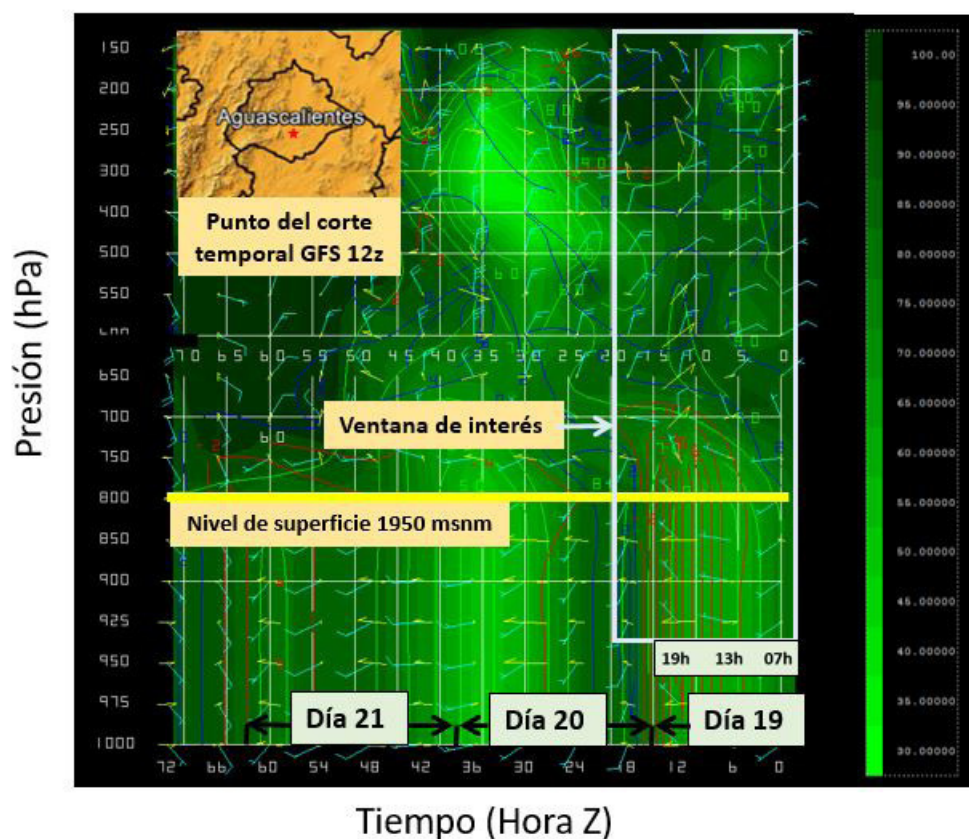


Figura 3. Corte vertical en Aguascalientes con datos del modelo numérico GFS. El gráfico muestra la configuración de la convergencia (rojo), divergencia (azul), dirección e intensidad del viento (barbas de viento), ascensos ageostróficos (flechas) y humedad relativa > 70% (verde) para las 36 hrs de pronóstico del modelo, correspondiente a las 19 hrs del día 19 de junio de 2018.

ageostróficos que evidenciaron fuertes ascensos verticales de aire observados hasta 150 hPa (≈ 14 km), que incluso rebasaron la tropósfera, así como por un alto contenido de humedad relativa que incrementó de 80% en superficie hasta la saturación en niveles altos de la atmósfera. Los cortes indicaron, en el mismo horario, viento predominante del norte y noreste en la columna y mediante la temperatura potencial equivalente, inestabilidad que rebasó el nivel donde se ubicó la isoterma de -40° (>250 hPa), lo que mostró la condición necesaria para la generación de granizo (Figura 4).

Los sondeos virtuales de las 13 y 19 hrs (Figura 5) indicaron mediante el perfil de viento, el dominio de advección cálida en la columna,

con la presencia de advección fría en la capa de 400-450 hPa, condición que evidenció la inestabilidad durante el día. Además, se observó mediante la configuración de las líneas de temperatura y temperatura de punto de rocío del sondeo, que a partir de las 13 hrs estuvo presente inestabilidad extrema. Esta situación se vio reflejada desde niveles bajos hasta la tropopausa, e incluso la inestabilidad superó este nivel hasta la estratósfera baja a las 19 hrs. Por otro lado, el sondeo a esta hora mostró la presencia de la condición de saturación desde el nivel de condensación por ascenso, hasta el nivel de condensación libre y el movimiento de los sistemas de tormentas de acuerdo a las hodógrafas virtuales en Aguascalientes, que se mantuvo de Este a Oeste.

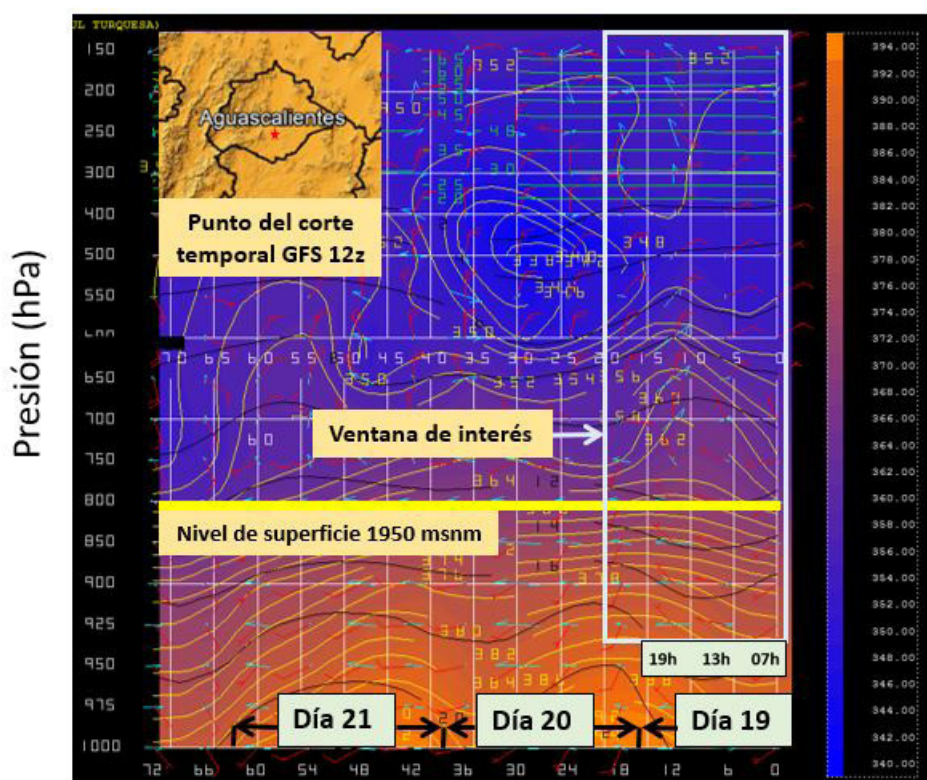


Figura 4. Corte vertical en Aguascalientes con datos del modelo numérico GFS. Grafico muestra la configuración de los ascensos ageostróficos (flechas), temperatura $< -20^\circ$ (rojo), temperatura potencial equivalente (negro) y la razón de mezcla (verde) para las 36 hrs de pronóstico del modelo, correspondiente a las 19 hrs del día 19 de junio de 2018.

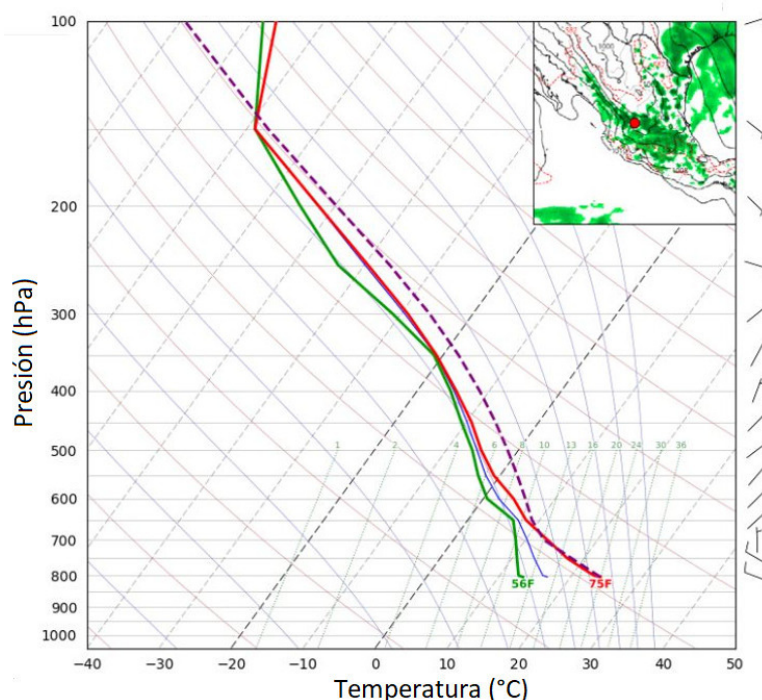


Figura 5. Sondeo virtual para las 19 hrs local del 19 de junio de 2018 en Aguascalientes. Modelo GFS (recuperado de <https://www.tropicaltidbits.com>).

Los montos de lluvia pronosticados por el modelo GFS, oscilaron en el rango de 25-50 mm (Figura 6), mismos que estuvieron ligeramente por debajo de la lluvia registrada acumulada en 24 hrs (≈ 15.4 mm por debajo). Sin embargo, el análisis de las variables meteorológicas de manera individual indicó que existían las condiciones necesarias para la generación de precipitación líquida con acumulados mayores a 50 mm en menos de tres horas, con fuerte actividad eléctrica asociada, principalmente a partir de las 19 hrs. Una muestra de lo anterior es el indicativo directo del contenido de agua de la columna atmosférica, el agua precipitable, que mostró valores de entre 30 y 35 mm durante el transcurso del día, valores que están asociados a la ocurrencia de lluvias muy fuertes en el Estado.

Para resaltar tales valores, se anexa a continuación el radiosondeo de la estación de Guadalupe, Zacatecas (Figura 7), que se localiza aproximadamente a 97 km de la ciudad de Aguascalientes y que es representativa de la zona de estudio de acuerdo con la OMM, ya que

sugiere que una estación de radiosondeo tiene un alcance de representatividad en un radio de 200 km. Este sondeo correspondiente a las 12Z muestra ausencia de CAPE (energía potencial disponible para convección) y CIN (inhibición convectiva), así como un valor positivo del índice de levantamiento (2.77) indicando una atmósfera estable. Dicha situación para este caso señala que el método de parcelas (índice de levantamiento) y el método termodinámico (CAPE/CIN) no aportaron información suficiente para la predicción de la tormenta severa ocurrida. Sin embargo, el valor de 25.03 mm de agua precipitable en el sondeo denotó valores importantes y acordes con la evolución en el tiempo de esta variable, de acuerdo con el pronóstico del modelo GFS.

El patrón sinóptico pronosticado por el GFS entre las 16 y 19 hrs en nivel de superficie, mostró mediante las líneas de flujo el aporte de humedad del Golfo de México hacia el Estado, debido a la amplia circulación de una baja presión que se localizó en el noreste del país, además

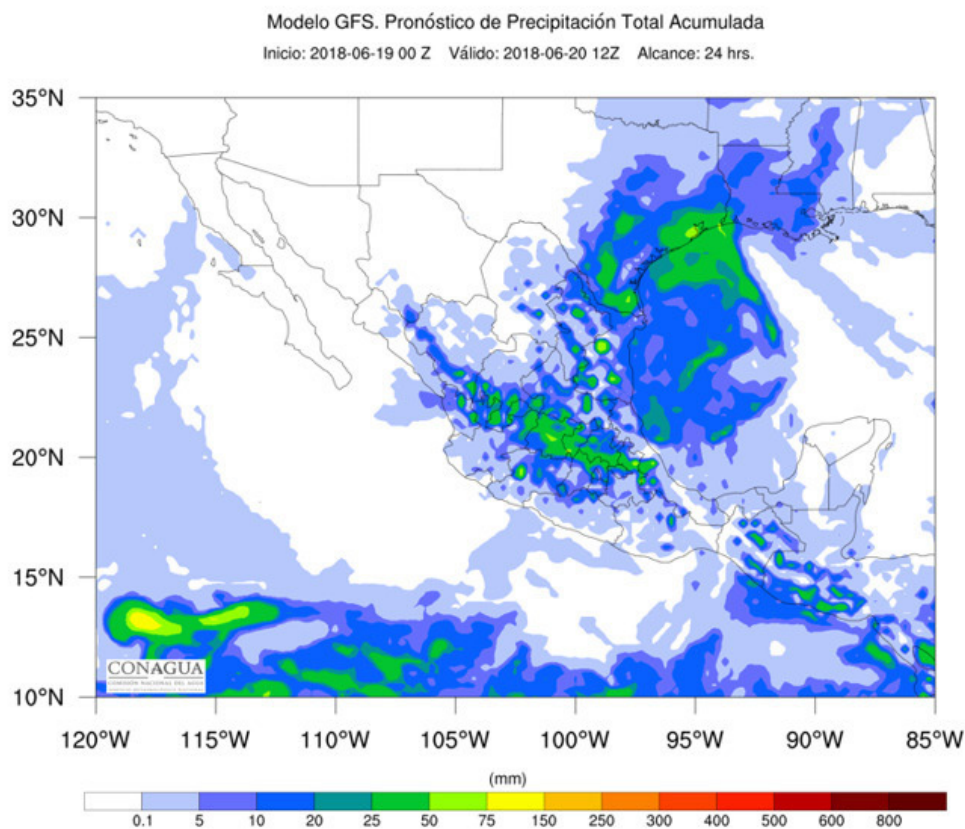


Figura 6. Pronóstico de precipitación total acumulada en 24hrs para el 19 de junio de 2018. Modelo GFS de las 12Z. Tomado del archivo de la CGSMN.

de la presencia de una vaguada desprendida de esta baja presión que favoreció el ascenso en superficie en Aguascalientes. En niveles medios, las líneas de flujo indicaron el reflejo de esta vaguada en superficie, reforzando el ascenso hasta niveles altos de la atmósfera, en donde el modelo pronosticó una amplia zona difluente generada por dos circulaciones anticiclónicas, la primera con centro en el norte de Baja California dominando la región noreste, centro norte y occidente de México y la segunda con centro en Florida, E.U.A. con influencia hasta el noreste de nuestro país.

Discusión y conclusiones

Las cartas del CIMSS mostraron la presencia de una amplia zona de convergencia sobre la Sierra Madre Occidental durante el día que ocurrió

la tormenta, con valores máximos en la zona de estudio. El acoplamiento con la divergencia en altura tuvo lugar a partir de las cuatro de la tarde, intensificándose alrededor de las 19 hrs (Figura 8), al igual que los valores positivos de vorticidad relativa en 850 hpa, con un máximo a la misma hora. Además, los valores de cizalladura registrados a la hora de la ocurrencia de la tormenta severa oscilaron entre 15 y 20 km/h (Figura 9), mismos que fueron favorables de acuerdo a la simbología del CIMSS para el desarrollo de tormentas en el Estado.

El seguimiento de las imágenes satelitales indicaron que la línea de vaguada al inicio del día no se ubicó sobre la ciudad, permitiendo la ausencia de nubosidad y el calentamiento diurno en la región. La convección dio inicio a partir de las 17 hrs al este de Aguascalientes, cuando el

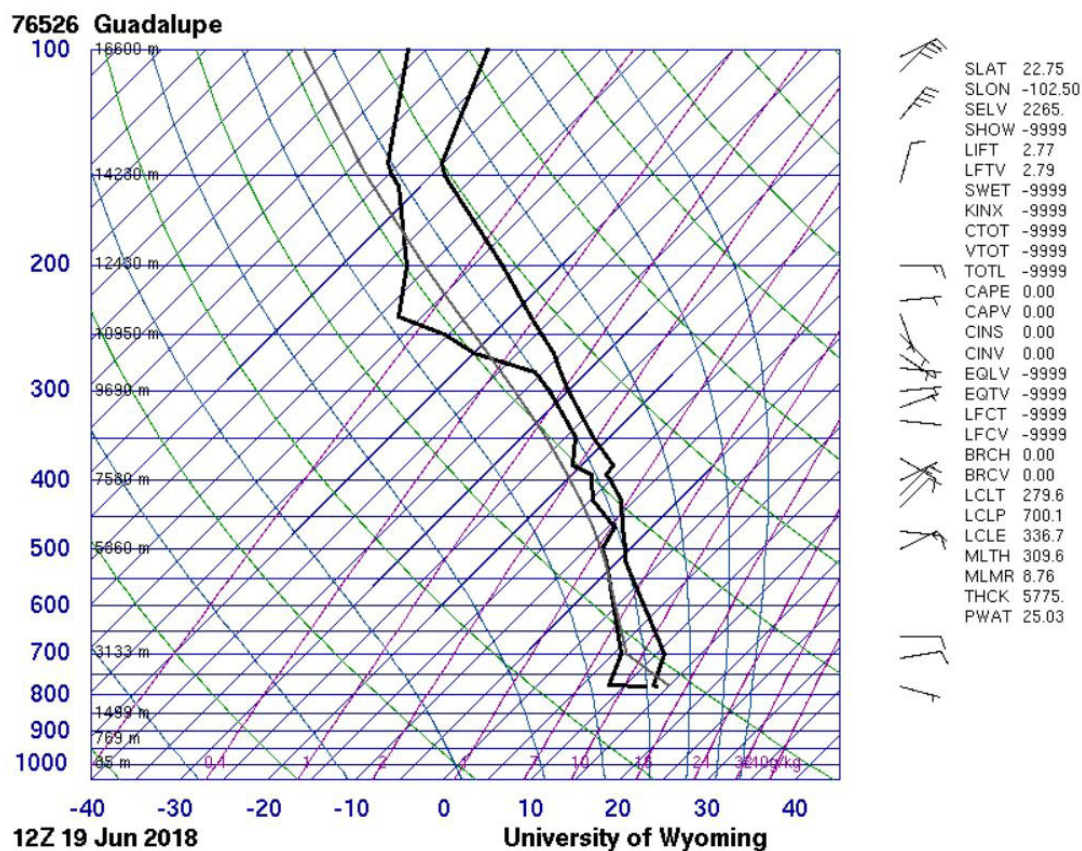


Figura 7. Sondeo de la estación en Guadalupe, Zacatecas de las 12Z (recuperado de <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>).

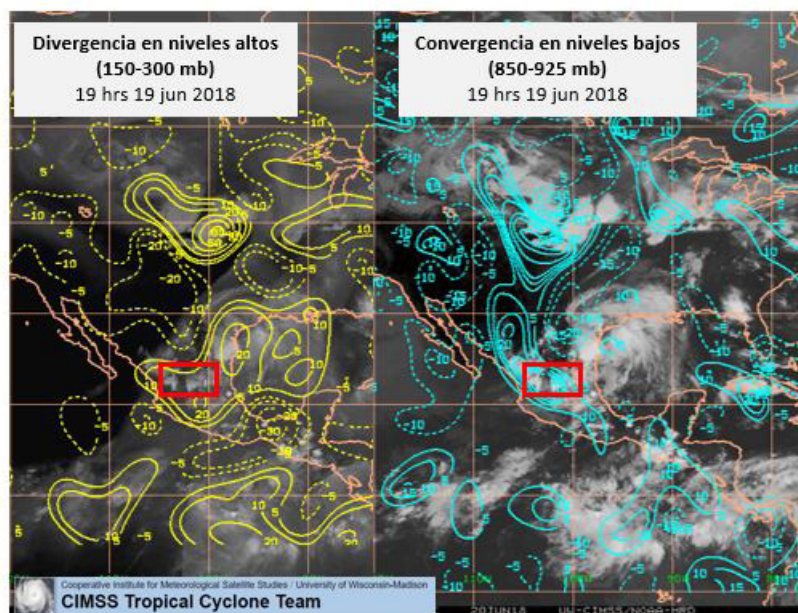


Figura 8. Cartas de divergencia en niveles altos y convergencia en niveles bajos. Tomadas del archivo del CIMSS.

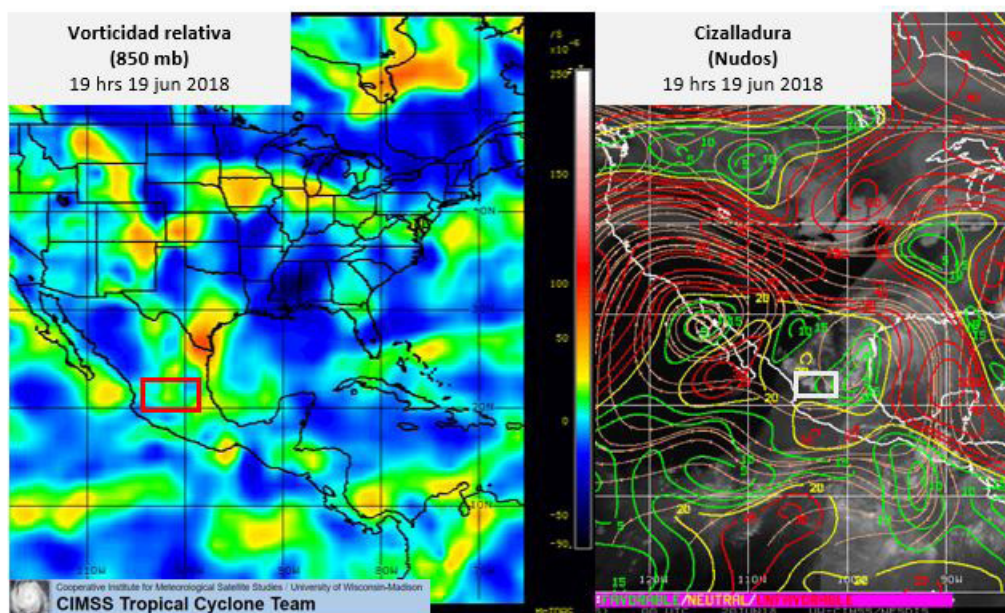


Figura 9. Cartas de vorticidad relativa en 850 mb y cizalladura. Tomadas del archivo del CIMSS.

lado derecho del eje de la vaguada se localizó sobre la zona de estudio, cubriendo al Estado completo en cuestión de minutos.

Una vez iniciado el sistema de tormentas, se observó que los densos núcleos convectivos, se intensificaron entre las 19 y las 20 hrs sobre la ciudad de Aguascalientes, rebasando los 18 km de altura (Figura 10). De acuerdo con información de los reportes METAR y a la red de rayos y tormentas en tiempo real, la formación de la tormenta severa de gran desarrollo vertical se acompañó de vientos de poco más de 30 km/h, fuerte actividad eléctrica y disminución de la visibilidad en menos de 900 m, sobre todo en el radio de alcance de la estación meteorológica del aeródromo y, aunque el territorio de Aguascalientes se considera relativamente poco accidentado, la incidencia del viento del Este sobre la región montañosa del Estado, favoreció la circulación local que generó el fuerte mecanismo de ascenso sobre la ciudad, principalmente a las 19 hrs como lo pronosticó el modelo.

Con respecto a los registros de lluvia (Figura 11), éstos indicaron una precipitación de 56.2 mm en tan solo una hora (≈ 19 -20 hrs), alcanzando los 65.4 mm en el transcurso del resto de la noche del día 19 y madrugada del día 20, ya que se mantuvo convección llana en el Estado durante las horas posteriores al evento, situación que no resolvió favorablemente el modelo GFS, ya que los acumulados trihorarios pronosticados por el mismo de las 19 a las 22 hrs no rebasaron los 20 mm, pero sí se acercaron en el acumulado en 24 hrs.

De lo anterior, se concluye que la tormenta estuvo asociada a valores de agua precipitable por arriba de 30 mm, considerados como significativos para la evolución del evento y se establecen valores de algunos índices de estabilidad y valores de algunas variables que caracterizaron a la tormenta severa del 19 de junio para tomarlos en cuenta a futuro en el proceso del pronóstico local. Además, el análisis indicó que el desarrollo del sistema convectivo, fue sensible

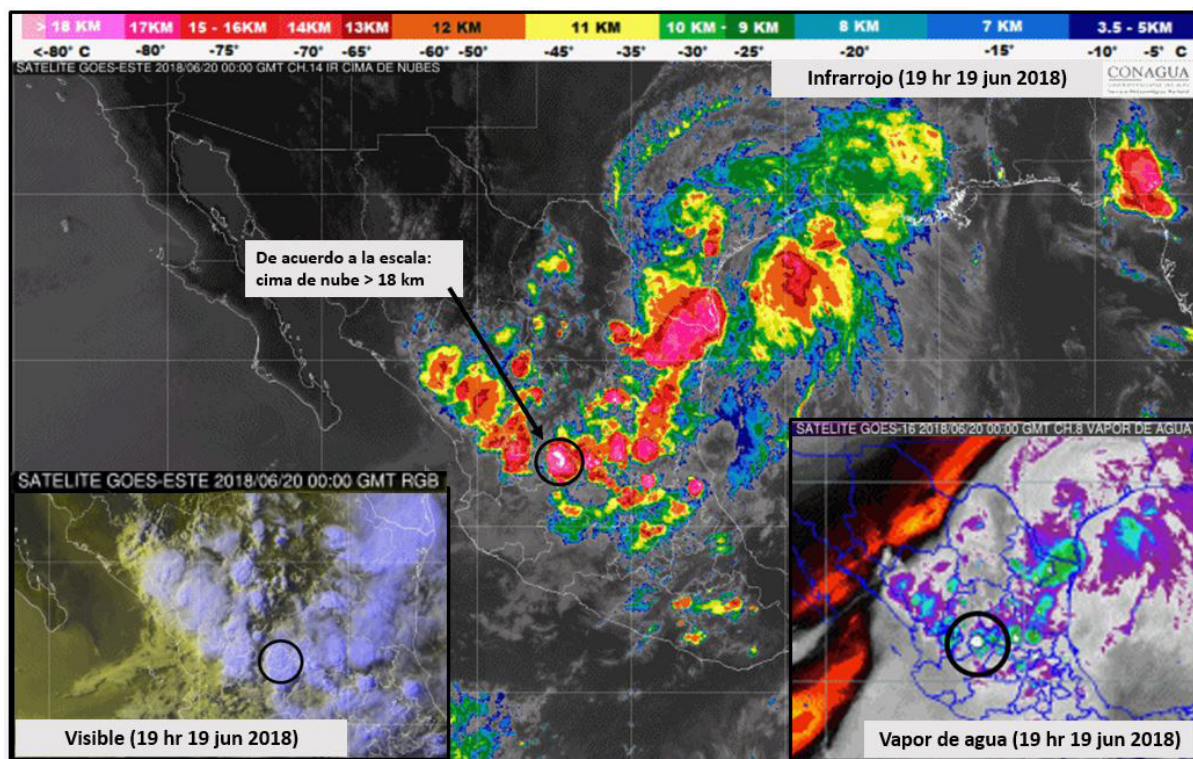


Figura 10. Imágenes satelitales en canal infrarrojo, visible (RGB) y vapor de agua para el 19 de junio de 2018, a las 19 hrs local (máximo detectado del evento). Tomado del archivo de la CGSMN.

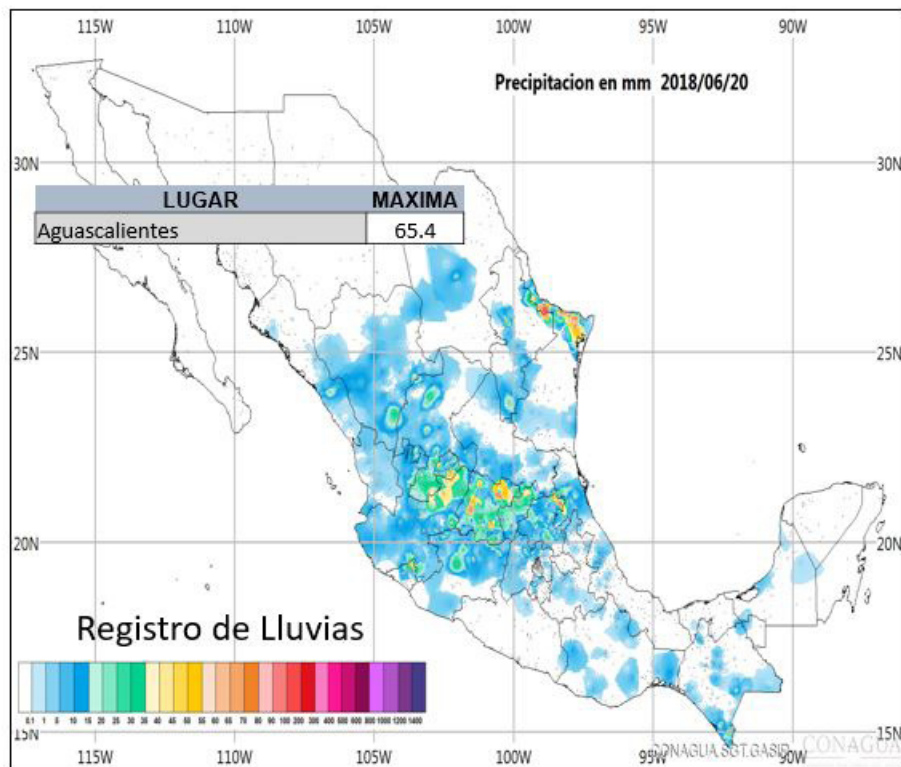


Figura 11. Registro de lluvias de las 08:00 hrs del 19 de junio a las 08:00 del 20 de junio de 2018. Tomado del archivo de la CGSMN.

a la circulación del flujo de viento continuo que incidió perpendicularmente sobre la Sierra Madre Occidental y el Eje Neovolcánico, debido al patrón sinóptico que generó la convergencia en superficie necesaria para la inestabilidad potencial, su acoplamiento con la divergencia en altura y el calentamiento diurno.

Finalmente, se enfatiza que la aplicación del método del embudo en el análisis por variable para la detección de tormentas severas en Aguascalientes, mediante los datos del modelo GFS de las 12Z, representaron una buena aproximación de las condiciones reales del evento analizado. Se recomienda no sólo consultar el pronóstico de lluvia acumulada en 24 hrs, sino tomarlo en cuenta para localizar montos máximos de precipitación y realizar el análisis individual por variables con el fin de localizar temporalmente las señales más significativas y su ubicación de manera local. Si se pretende replicar el experimento hacia otras regiones, se debe tomar en consideración como uno de los primeros pasos en la caracterización de una tormenta, el ajustar los valores de los índices de estabilidad que se utilicen para la región de estudio, ya que en un principio, estos fueron creados para otras latitudes.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo económico otorgado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt), para realizar los estudios en la especialidad de Meteorología Marítima en el Instituto Oceanográfico del Golfo y Mar Caribe, de la Universidad Naval. Gracias a este apoyo los jóvenes estudiantes contribuyen al fortalecimiento de la ciencia en nuestro país. Asimismo, agradecen los comentarios acertados y las correcciones realizadas a este trabajo por el Dr. Cuauhtémoc Turrent Thompson, los cuales fueron muy valiosos y atinados.

Referencias

- Aviation Weather Center, 2018. Reportes recuperados del informe de aeródromo meteorológico. <https://www.aviationweather.gov/metar>
- Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies, 2018. Cartas recuperadas de convergencia, divergencia, cizalladura, vorticidad relativa, viento en niveles bajos y viento en niveles medios y altos. Space Science and Engineering Center, University of Wisconsin-Madison (<https://tropics.ssec.wisc.edu/>)
- INEGI, 2013. Conociendo Aguascalientes. México, p. 4-10.
- Mezo, M.V., 2020. Análisis de la lluvia ocurrida en Aguascalientes el 19 de junio de 2018, para la aplicación en el pronóstico de tormentas severas en el Estado. Tesis de Especialidad. Instituto Oceanográfico del Golfo y Mar Caribe. México.
- National Centers for Environmental Information (NCEI) 2018. Datos recuperados del Global Forecast System (GFS). <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs>
- Prieto et al., 2010. Tormentas Severas. Centro Nacional de Prevención de Desastres, Serie Fascículos, México, p. 3.
- Rojas, J. A., 2020. Evaluación de los índices de estabilidad atmosférica para la aplicación en el pronóstico de precipitación en la ciudad de Veracruz. Tesis de Especialidad. Instituto Oceanográfico del Golfo y Mar Caribe. México.
- Servicio a la Navegación en el Espacio Aéreo Mexicano, 2018. Cartas de superficie y niveles obligados. Recuperados de: <http://capma.seneam.gob.mx/capma/capma.html>

Servicio Meteorológico Nacional, 2018. Imágenes satelitales recuperadas en canal infrarrojo, visible y vapor de agua, registros de lluvia y mapas de pronóstico del modelo GFS, México.

Tropical Tidbits, 2018. Sondeo recuperado para Aguascalientes del 19 de junio de 2018 con datos del Global Forecast System (GFS). <https://www.tropicaltidbits.com/analysis/models/>

University of Wyoming, 2018. Radiosondeo de la estación 76526 correspondiente a Guadalupe, Zacatecas. <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>

Manuscrito recibido: 23 de octubre de 2020

Recepción del manuscrito corregido: 3 de marzo de 2021

Manuscrito aceptado: 26 de abril de 2021

Con un cordial saludo

Luis A. Delgado Argote y Ruth Cerezo Mota
Editores



geos

Información con:

Ivonne Pedrín Morales
División de Ciencias de la Tierra
Tel: 01(646)174-5050
Ext: 26004
Correo electrónico: ipedrin@cicese.edu.mx



geos

