

Análisis comparativo entre 13 leyes de atenuación y los registros de un sismo de grado 7.1 en magnitud Richter ocurrido en Japón.

Moncayo Theurer, M.¹, Velasco, G.², Rodríguez Josue.², Terán²

Fecha de recepción: 23 de noviembre de 2016 – Fecha de aprobación: 17 de febrero de 2017

RESUMEN

Un sismo de 7.1 en magnitud Richter, ocurrido en Japón, fue escogido para análisis ya que cuenta con un número importante de registros, en este trabajo se contrasta la información proporcionada por las estaciones de medición frente a la predicción de trece leyes de atenuación. Las leyes de atenuación son el insumo necesario para estimar el riesgo sísmico que es la base para el arranque de todo diseño estructural sismo resistente, por lo que conviene medir su efectividad.

Se identificó una curva de aceleraciones máximas para el sismo en estudio y se la comparó con una curva resultante de la predicción de 13 curvas de atenuación con respecto a la distancia. Se identificó las leyes de atenuación que se acercan más a las aceleraciones registradas, también se identificó las curvas más conservadoras, el error relativo y en que rangos son más eficientes.

Palabras Claves: Ley de atenuación, terremoto, riesgo sísmico, Magnitud Richter, Aceleraciones Máximas.

Comparative analysis between 13 attenuation laws and the records of an earthquake of 7.1 in Richter magnitude occurred in Japan.

ABSTRACT

An earthquake measuring 7.1 in magnitude in Japan was chosen for analysis because it has a significant number of records. In this work the information provided by the measurement stations is compared against the prediction of thirteen attenuation laws. The attenuation laws are the necessary input to estimate the seismic risk that is the basis for the start of any structural design earthquake resistant, so it is appropriate to measure their effectiveness.

A maximum acceleration curve for the earthquake under study was identified and compared with a curve resulting from the prediction of 13 attenuation curves with respect to distance. It was identified attenuation laws that are closer to the recorded accelerations, also identified more conservative curves, relative error and in which ranges are more efficient.

Keywords: Attenuation Law, Richter Scale, Earthquake, Efficiency, Richter Magnitude, Maximum acceleration.

¹ Coordinador de Investigaciones de la Universidad de Guayaquil, Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas (UG), profesor de la universidad Estatal de Santa Elena, Facultad de Ciencias de la Ingeniería. Academia de Guerra Naval (AGUENA). Correo electrónico: marcelo.moncayot@ug.edu.ec; solugran@gmail.com.

² Profesor Titular de la Universidad de Guayaquil, Facultad de Ciencias Matemáticas y Físicas

INTRODUCCIÓN

Ley de atenuación

La ley de atenuación es una expresión semiempírica que relaciona magnitud, distancia e intensidad del registro de un sismo y describe la forma de disipación de energía que se libera en el epicentro, el propósito más importante de una curva de atenuación es predecir las aceleraciones que se provocarán, debido a un sismo de magnitud “M”, a una distancia establecida.

Los registros sísmicos son la materia prima para lograr una curva de predicción de aceleraciones o ley de atenuación. Varios autores han propuesto leyes de atenuación partiendo de bases sísmicas de sus propios países entendiendo que los datos de la base sísmica dependen de las características de los suelos que constituyen la corteza en el sitio de donde provienen.

Por ejemplo, la ecuación de McGuire (MC), se realizó con datos sísmicos del occidente de Estados Unidos en 1974, la fórmula de Gómez-Ordaz-Tena (GOT1) y (GOT2), con datos de México, Ordaz también planteó una formula con Jara y Singh (OJS) en 1989. Saragoni propone su Ley de Atenuación a partir de datos de sismos de Chile. (Ver Tabla 1).

Se han evaluado 13 leyes de atenuación, que se encuentran detalladas en la Tabla 1 con sus respectivas ecuaciones, las leyes que se evaluarán son: Donovan 1 (D1) (Aguiar 2000), Donovan 2 (D2) (Aguiar 2000), Donovan 3 (D3) (Chavez 2010), McGuire (MC) (Aguiar 2000), Gómez-Ordaz-Tena-1 (GOT1) (USGS 2012), Gómez-Ordaz-Tena-2 (GOT2) (USGS 2012), Ordaz-Jara-Singh (OJS) (Gomez et al. 2005), Singh (Si), Grases 1 (G1) (Chavez 2010), Grases 2 (G2) (Chavez 2010), Aguiar 1 (A1) (Chavez 2010) y Aguiar 2 (A2) (Chavez 2010), Saragoni (Sa) (Chavez 2010).

Tabla 1. Fórmulas de las 13 leyes de atenuación en estudio.

Ley de Atenuación	Ecuación
Donovan 1 (D1)	$a_h = 1320e^{0.580M}(R + 25)^{-1.520}$
Donovan 2 (D2)	$a_h = 1080e^{0.500M}(R + 25)^{-1.320}$
Donovan 3 (D3)	$\ln(a_h) = 6.98 + 0.50M - 1.25\ln(R + 25)$
McGuire (MG)	$a_h = 472.3e^{0.640M}(R + 25)^{-1.301}$
Gómez, Ordaz y Tena (GOT1)	$\ln(a_h) = 2.308 + 0.780M - 0.844 \ln(R) - 0.004(R)$
Gómez, Ordaz y Tena (GOT2)	$\ln(a_h) = 1.237 + 1.519M - 0.0313M^2 - 0.844 \ln(R) - 0.004(R)$
Ordaz, Jara y Singh (O.J.S.)	$\log_{10}(a_h) = 1.760 + 0.30M - \log_{10}(R) - 0.00310(R)$
Singh (Si)	$\log_{10}(a_h) = -0.148 + 0.623M - \log_{10}(R) - 0.00320(R)$
Grases 1 (G1)	$\ln(a_h) = 3.75 + 0.470M - 0.570(\ln(R + 10) - 0.670)$
Grases 2 (G2)	$\ln(a_h) = 3.75 + 0.470M - 0.570(\ln(R + 10) + 0.670)$
Aguiar 1 (Ag.1)	$\ln(a_h) = 6.35 + 0.99M - 1.76 * \ln(R + 40) - 0.6$
Aguiar 2 (Ag.2)	$\ln(a_h) = 6.35 + 0.99M - 1.76 * \ln(R + 40) + 0.6$
Saragoni (Sa)	$\ln(a_h) = 8.54 + 0.570M - 1.73\ln(R + 60)$

(Martinez, 2007) (Aguiar, 2000) (Chavez, 2010) (Gómez, Ordaz, & Tena, 2005).

Donde:

a_h (cm/seg² o gals) : Aceleración Máxima en el punto de estudio para un sismo de magnitud M y distancia R.

M: Magnitud Richter M_w del sismo.

R (Km): Distancia entre el punto de estudio al punto del epicentro del sismo.

METODOLOGÍA

Sismo de control

Se evaluaron 13 leyes de atenuación para compararlas con las aceleraciones obtenidas de 136 registros provenientes de estaciones de medición sísmica

cercanas al epicentro (CESMD 2011) para poder estimar la eficiencia de las curvas en la predicción de aceleraciones. El sismo escogido o de control, para esta comparación fue el ocurrido el jueves 7 de abril del 2011 a las 23:32 (hora local) que tuvo su epicentro

a 116 kilómetros de Fukushima y a 330 kilómetros de Tokio, este evento, conocido como el sismo de Miyagi, es considerado como premonitor del Gran terremoto de Japón del 11 de marzo del 2011 (USGS 2012).

El sismo de control dejó daños graves a poblaciones cercanas al epicentro, su hipocentro se situó a 49 kilómetros de profundidad frente a las costas de la prefectura de Miyagi, cuya capital es Sendai. Luego del movimiento telúrico, las autoridades del Japón dieron aviso de una alerta de tsunami, noventa minutos después fue cancelada por la agencia meteorológica de Japón (DG Deganaadores 2011).

Según el servicio geológico de los Estados Unidos el sismo de grado 7.1 tuvo una duración de 36 segundos y se produjo como resultado directo del empuje de fallas inversas cerca del límite de subducción entre la placa del Pacífico y la placa de América del Norte.

Evaluación de las curvas de atenuación

Una ley de atenuación es un modelo matemático que predice la aceleración que se produce a una distancia determinada desde el epicentro, esta distancia se mide hasta la ubicación de la estructura que se busca diseñar.

Primero se define la distancia “R” en kilómetros, esta es la distancia horizontal entre la ubicación del epicentro y el punto que nos interesa estudiar, para este trabajo, se evaluaron las curvas para distancias desde 1 hasta 500Km. Este rango corresponde al de mayor afectación en eventos telúricos

Segundo se especifica la magnitud “M”, en esta investigación, el sismo de control tiene una magnitud definida de 7.1 grados en escala Richter.

Gráfica de aceleraciones

De los 136 registros disponibles para el sismo de control, se obtuvieron las historias de tiempos de sus tres canales, de esta base de datos se escogió el máximo valor de aceleración para cada estación, para graficarla versus la distancia de la estación al epicentro de donde se obtuvo la curva continua en azul de la Figura 1 y 2.

En Figura 1, se muestra el cálculo de una curva de regresión promedio de los datos mencionados, que corresponde a una línea entrecorta en rojo.

En Figura 2, se muestra el cálculo de una curva de

regresión de la envolvente máxima de los datos mencionados, que corresponde a una línea entrecorta en rojo.

Datos sísmicos

La curva en azul en la figura 1, está construida con los valores máximos de aceleración de cada registro del sismo de control. Existe una gran variabilidad entre los valores de las aceleraciones registradas. Esta dispersión se explica debido a que la onda sísmica no se esparce de manera equitativa en todas las direcciones, existen direcciones principales en la cuales se registran aceleraciones más altas. Se observa (Figura 1) que a una distancia de 142 km, se registró una aceleración de 1.476gals y a la misma distancia, en otra estación, se registró 379gals, la primera cuatro veces más alta que la segunda.

Curva Promedio de Aceleraciones Registradas para el sismo de grado 7.1 (CPAR7)

De la figura 1 se desprende que los datos registrados para este sismo, se extienden desde los 120 hasta 350 Km de distancia epicentral y que.

Luego de un proceso matemático de regresión se determinó que la curva que más se ajusta a los datos es una curva exponencial que se muestra en la figura 1 (marcada con línea roja entrecortada), a esta curva se le llamó Curva Promedio de Aceleraciones Registradas para el sismo de 7.1 (CPAR7).

Curva de Máximas Aceleraciones Registradas para el sismo de grado 7.1 (CMAR7)

En la figura 2, la curva roja con línea entrecortada, fue calculada con un procedimiento matemático de regresión, dentro del cual se determinó que la curva más apropiada para describir los datos es una curva exponencial. Esta curva de regresión se la calculó para los valores máximos de la envolvente de la curva en azul o de las aceleraciones máximas. La curva descrita en línea roja entrecortada se le dio el nombre de Curva de Aceleraciones Máximas Registradas para el sismo de 7.1, (CMAR7).

RESULTADOS

Gráfico de las leyes de atenuación

Se graficaron las trece curvas de atenuación (Ver Figura 3), cada autor ha publicado varias fórmulas de atenuación, las fórmulas que dan predicciones más eficientes han sido dibujadas con línea continua.

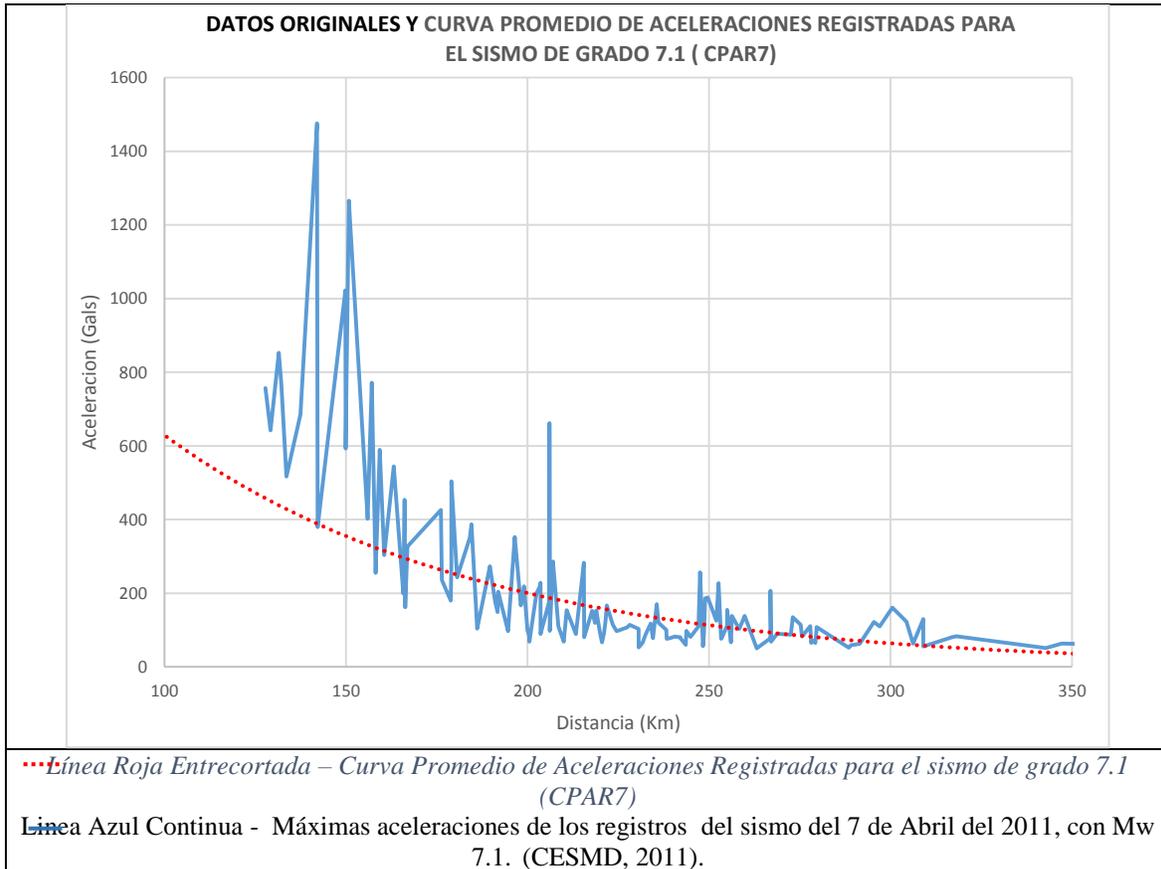
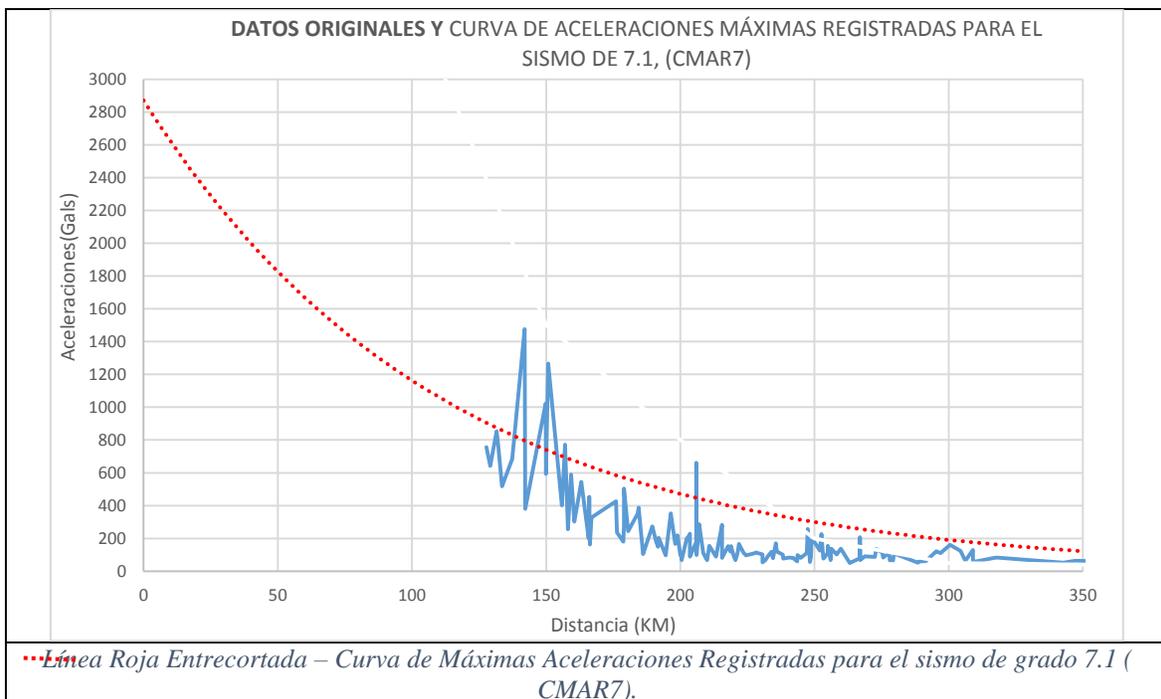


Figura 1.



— Línea Azul Continua - Máximas aceleraciones de los registros de 136 estaciones del sismo de control, ocurrido 7 de Abril del 2011, con Mw 7.1 en Japón (CESMD, 2011).

Figura 2.

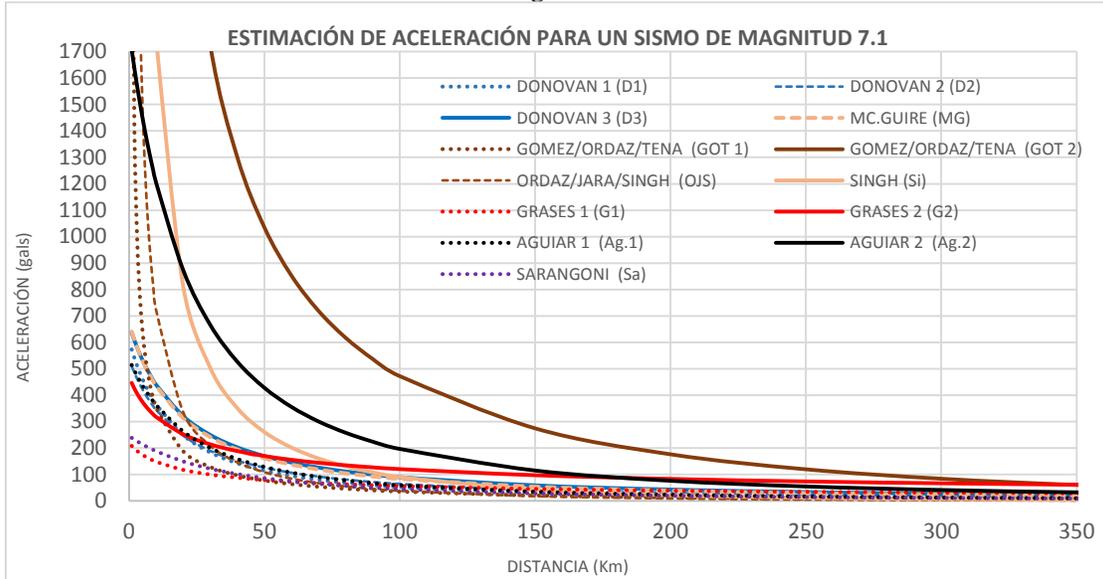


Figura 1. Estimación de la aceleración de trece leyes de atenuación para un sismo de grado 7.1

Luego de la evaluación se determinó que un grupo de ellas predicen valores razonables a lo largo de toda la distancia “R”, pero también existe un grupo de curvas que al evaluarlas cerca de la distancia cero, el resultado es muy alto.

Tipificación de leyes de atenuación de acuerdo a su comportamiento cercano a la distancia cero.

Las curvas que evaluadas cercanas al epicentro, es decir distancia “R=0”, mantienen valores de aceleración razonables son: Donovan 1(D1), Donovan 2(D2), Donovan 3(D3), McGuire (Mc), Aguiar 1-2 (A1 - A2), Grases 1-2 (G1 - G2) y Saragoni (Sa). (Ver Tabla 2).

Las curvas que calculan valores muy altos en la cercanía del epicentro o distancia “R” = 0 son: Gómez Ordaz Tena1-2 (GOT 1-2), Ordaz Jara Singh (OJS) y Singh (Si).

Resultados de la evaluación de las trece leyes de atenuación

Considerando el grupo de curvas con valores razonables en las cercanías de “R”= 0, se puede deducir que de 0 a 200 Km de distancia epicentral, la fórmula de Aguiar 2 (A2) calcula el valor más conservador, mientras que a distancias superiores de 200 km, Grases 2 (G2) calcula los valores más altos (Figura 3). De este grupo se observa que la curva de

atenuación que calcula el valor más alto es Aguiar 2 (A2) con 1.700 gals, Donovan 3 (D3) y McGuire (Mc) alcanzan los 650 gals aproximadamente.

Del grupo de curvas que calculan valores muy elevados al evaluarlas cercanas a la distancia cero, se observa que la Curva Gomez/Ordaz/Tena 2 (GOT 2), calcula los valores más altos entre las trece curvas consideradas.

En la Figura 4 se presenta la predicción de las trece leyes contrastadas con la curva CMAR7, que corresponde a una curva de tendencia de la envolvente de las aceleraciones máximas medidas en todas las estaciones.

Del primer grupo de fórmulas que calculan valores razonables en la cercanía del epicentro, la que más se acerca a CMAR7 es Aguiar 2 (A2), del otro grupo la fórmula que calcula valores más cercanos a CMAR7 es Gómez – Ordaz – Tena 2 (GOT 2).

Existe una diferencia bastante notable entre las predicciones de las trece leyes evaluadas y la “Curva de Máximas Aceleraciones Registradas en un Sismo de Grado 7” – “CMAR7” que contiene las aceleraciones máximas registradas en el sismo de control, por lo que es necesario continuar con el análisis.

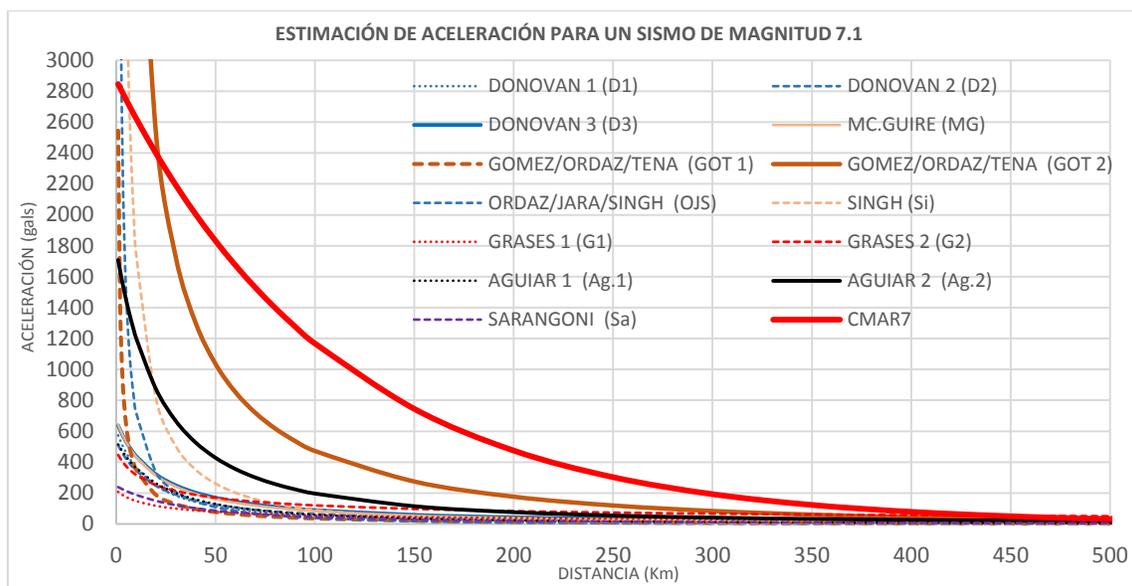


Figura 2. Comparación entre la curva de aceleraciones máximas del registro del sismo de grado 7.1 y la estimación de aceleraciones de 13 leyes de atenuación

Comparación entre el resultado de la evaluación de las leyes de atenuación y los registros de aceleración del sismo en estudio.

En la figura 3 se observa, por ejemplo, que según la predicción de la ecuación de Aguiar 2 (A2), a 150 Km de distancia epicentral, este tipo de sismo produciría una aceleración de 115 gals, en contraste, los registros del sismo de control, señalan lo siguiente: En la estación MYG012Shiogama, a 142 Km de distancia se registró 1.475 gals; En la estación MYG004Tsukidate, a 150 Km de distancia se registró 1.270 gals; En la estación MYG013Sendai, a 150 Km de distancia se registró 1.025 gals. Es decir que la curva de Aguiar 2 (A2), la más alta del primer grupo de nueve curvas, solo llega a predecir el 8% de la aceleración máxima que se registró en el sismo en estudio.

La ley de Aguiar 2 (A2), a una distancia de 200 Km, calcula una aceleración probable de 76gals, pero los registros del sismo en estudio indican que: En la estación TIWTH02TAMAYAMA a 205 Km de distancia, se registró 660 gals; En la Estación FKS009ONO a 207 Km, se registró 286 gals; en la estación FKS008FUNEHKI a 204 Km, se registró 228 gals. La curva de atenuación de Aguiar 2 (A2), a una distancia de 200 Km, predice un 12% de las aceleraciones registradas en el sismo de estudio.

A los 350 Km de distancia, Aguiar 2 (A2) calcula una aceleración de 40 gals; En contraste, en la estación

CHB003SHIROI a 356 Km de distancia epicentral, se registró 85 gals, alcanzando el 47% del valor del registro.

Las fórmulas de atenuación de Aguiar 2 (A2) y MC. GUIRE (MG), fueron las que calcularon valores más altos en la distancia desde 0 a 200 Km, sin embargo, en ese rango de distancia estas curvas de atenuación predicen solo el 8% de las aceleraciones registradas en el sismo de estudio. La predicción de las curvas mejora a partir de los 300 Km.

A los 150 Km, la curva “CMAR7”, muestra aceleraciones de 750 gals, la fórmula de Aguiar 2 (A2) calcula 114 gals, la Ley de Grases 2 (G2) calcula 97 gals, la fórmula de Donovan 3 (D3) calcula 58 gals, la Ley McGuire (MG) calcula 53 gals, todas las demás está por debajo de los 46 gals.

Por lo tanto Aguiar 2 (A2) calcula un valor 85% más bajo que el registrado en el sismo en estudio, Grases 2 (G2) estima un valor 87% más bajo y Donovan 3 (D3) y McGuire (MG) estiman ambos un valor 92% más bajo que en la “CMAR7”. Estimaciones insuficientes para predecir las aceleraciones que el sismo en estudio produjo.

A los 300 Km, la curva de máximas aceleraciones registradas “CMAR7” muestra un nivel de aceleración de 200 gals, para esa distancia la Ley de Grases 2 (G2) calcula 66 gals, la fórmula de Aguiar 2

(A2) calcula 41 gals, la Ley de Grasas 1 (G1) calcula 31 gals, la formula Donovan 3 (D3) calcula 27 gals y todas las demás curvas están por debajo de los 25 gals.

Entonces la ley de atenuación de Grasas 2 (G2) calcula un valor de aceleración 67% más bajo del que lo alcanzado en el sismo en estudio, la fórmula de Aguiar 2 (A2) estima un valor 79% más bajo que el registrado, Grasas 1 (G1) estimó un valor 84% más bajo y Donovan 3 (D3) estimó un valor 86% más bajo que el registrado. Estas estimaciones son muy bajas frente a la demanda real del sismo de estudio.

Estimación de la aceleración epicentral para el sismo en estudio.

De acuerdo a las ecuaciones mostradas en la Tabla 1, se espera que la energía sísmica se disipe o la aceleración se atenúe, a lo largo de la distancia siguiendo una curva que en algunos casos es logarítmica y en otro exponencial. La curva de tendencia que más se ajusta a los datos registrados en el sismo de control es de comportamiento exponencial.

Si se considera que este comportamiento matemático exponencial de la atenuación del sismo en estudio se mantiene a lo largo de toda la distancia, se propone evaluar esta curva para identificar la posible aceleración en el epicentro, es decir a una distancia "R"= 0. , pero para evitar inconsistencias matemáticas debido se avaluó a una distancia epicentral "R" =1

Al extrapolar la ecuación de regresión calculada para la curva "CMAR7" que sigue las aceleraciones máximas del sismo en estudio, hasta una distancia de "R"=1 Km, se intenta estimar la probable aceleración en el epicentro.

La aceleración epicentral debería ser un valor característico de la curva de atenuación, no es común calcularlo porque en el pasado se contaba con pocos

registros, lo que volvía esta labor muy ineficaz.

En este caso considerando que un valor de 1.476 gals fue registrado a 142 Km del epicentro, se induce que en el epicentro este valor debe haber sido mayor.

Se extrapoló la curva exponencial "CMAR7" y se obtuvo 2.870 gals para R=1. (Ver Figura 2).

Análisis de las 4 curvas que calculan valores muy altos en la cercanía del epicentro.

En la tabla 2, se observa en amarillo, los valores calculados por las 4 ecuaciones que calculan valores muy altos en las cercanías del epicentro.

Se recomienda que estas curvas sean evaluadas desde ciertos rango de distancia, por ejemplo: En el caso de la Gomez-Ordaz-Tena-1 (GOT1) se recomienda la aplicación de esta ecuación con valores de "R">= 1 Km, en el caso de la ley Gomez-Ordaz-Tena-2 (GOT2), se recomienda evaluarla a partir de "R">= 20 Km, en el caso de la ley Ordaz-Jara-Singh (OJS) se recomienda evaluarla a partir de "R">= 2 Km y la ley de Singh (Si) deberá ser evaluada a partir de "R"=> 5 Km.

En la figura 4 se puede observar como la "Curva de Máximas Aceleraciones Registradas en un Sismo de Grado 7.1" – "CMAR7" se intersecta con la curva Gomez –Ordaz-Tena 2 (GOT 2) a una distancia de 20km, en 2.400gals, lamentablemente para valores menores de R, Gomez –Ordaz-Tena 2 (GOT 2) se eleva a valores muy altos.

Gomez –Ordaz-Tena 2 (GOT 2) es la curva, entre todas las trece curvas analizadas que tiene el comportamiento más cercano a la "CMAR7". Es decir, esta curva es la que predice más eficientemente las aceleraciones del sismo en estudio en el rango de aplicación recomendado.

Tabla 2. Cálculo de aceleraciones para 13 leyes de atenuación, en amarillo se indica los valores que por estar cercanos al 0, muestran valores altos (Unidades de la tabla gals)

DI ST .	MAG NITU D	(D1)	(D2)	(D3)	(M G)	(GOT 1)	(GOT 2)	(OJS)	(Si)	(G1)	(G2)	(Ag. 1)	(Ag. 2)	(Sa)
1	7.1	573. 11	509. 81	637. 39	640. 87	2545.2 9	34202. 94	7707.2 6	18711 .13	208. 16	446. 79	514. 46	1708 .06	238. 70
2	7.1	541. 16	485. 03	608. 02	610. 17	1412.3 1	18978. 29	3826.2 2	9286. 88	198. 09	425. 18	493. 09	1637 .13	232. 07
3	7.1	512. 06	462. 30	581. 00	581. 97	999.02	13424. 52	2532.6 7	6145. 80	189. 25	406. 21	473. 09	1570 .72	225. 74
4	7.1	485. 46	441. 37	556. 06	556. 00	780.53	10488. 50	1885.9 9	4575. 52	181. 42	389. 41	454. 33	1508 .43	219. 67

5	7.1	461.08	422.06	532.99	532.01	643.96	8653.35	1498.06	3633.54	174.43	374.39	436.71	1449.94	213.86
10	7.1	364.77	344.35	439.58	435.33	351.64	4725.29	722.77	1751.06	148.05	317.77	362.80	1204.52	188.12

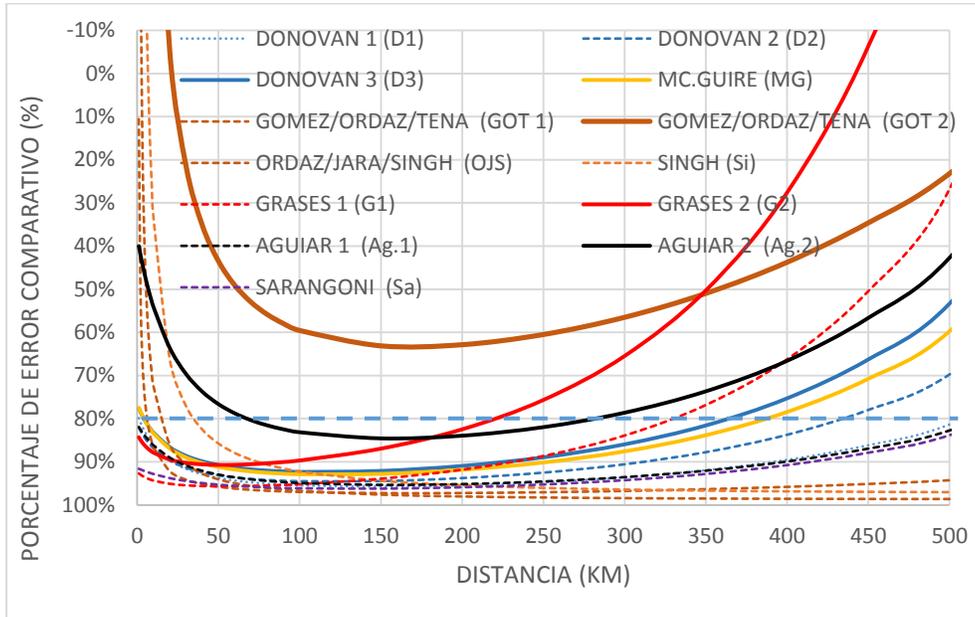


Figura 3. Porcentaje de error comparativo entre las leyes de atenuación y

Porcentaje de error comparativo de las leyes de atenuación frente a los registros del sismo en estudio.

Las trece leyes de atenuación estudiadas tienen el respaldo de procedimientos aceptados a nivel mundial por lo tanto en ellas no existe error técnico, ni error conceptual, fueron obtenidas por métodos válidos y corresponden al esfuerzo de valiosos investigadores en esta línea.

Este trabajo compara la evaluación de las leyes de atenuación con un sismo registrado de 7.1 grados en escala Richter. La diferencia entre las curvas de atenuación y la curva de aceleraciones máximas registradas CMAR7, se la ha llamado error relativo (Ver figura 5).

En figura 5 se observa que la mayoría de curvas de atenuación se apilan en la parte inferior y mantienen un error relativo superior al 80% con respecto a las aceleraciones máximas registradas en el sismo en estudio.

La ley de atenuación llamada Grases 2 (G2) mantiene un error relativo del 80% en el rango de distancia desde 0 - 220km, luego su error relativo empieza a reducirse llegando a tener un 30% a la distancia de 380 km.

En el caso de la curva de Aguiar 2 (A2), sobrepasa el 80% de error relativo en el rango entre 80 -280 Km, hasta los 450 Km, esta curva mantiene un error relativo superior al 50%.

En el Caso de Gomez-Ordaz-Tena 2 (GOT 2), en el rango desde 50 – 350 Km el error relativo se mantiene entre 50 a 60%. Llegando a un error del 25% en las cercanías de los 500 Km lo que la convierte en la ley de atenuación que más se acerca a la curva CMAR7 de aceleraciones máximas registradas para el sismo en estudio.

CONCLUSIONES

El 7 de Abril del 2011 ocurrió en las costas de Miyagi-Japón un sismo de 7.1 grados en escala Richter. Se cuenta con una base de datos de 136 estaciones y 3 canales por estación donde se registró el paso de la onda sísmica.

Se evaluaron 13 Leyes de Atenuación entre las cuales están: Donovan 1 (D1), Donovan 2 (D2), Donovan 3 (D3), MacGuire (MG), Gómez, Ordaz y Tena (GOT 1-2), Ordaz-Jara y Singh (OJS), Singh (Si), Grases 1 (G1), Grases 2 (G2), Saragoni (Sa), Aguiar 1(6) (A1) y Aguiar 2 (A2).

Se definieron dos grupos de ecuaciones. El primer

grupo de 9 ecuaciones se pueden evaluar cercanas al cero y el segundo grupo de 4 curvas calculan un valor muy elevado en la cercanía del cero.

Dentro del primer Grupo de las 9 curvas, que se pueden evaluar cerca al cero, las que mejores resultados calculan son: Aguiar 1 (A1), Mc.Guire (MG), Grases 2 (G2) y Donovan 3 (D3).

Dentro del grupo de las 4 curvas que calculan valores muy altos cerca del cero la que mejor se desarrolla es la Gomez-Ordaz-Tena-2 (GOT 2), la curva mencionada es la que más se acerca a la curva "CMAR7", que representa las aceleraciones máximas registradas en el sismo en estudio.

Las 13 leyes de atenuación evaluadas, entre 0 y 400 km de distancia, predicen valores muy bajos de aceleración con respecto a lo registrado en el sismo en estudio. El análisis muestra que las Leyes de Atenuación estudiadas solos alcanzan a predecir entre el 8% - 12% de las aceleraciones máximas registradas en el sismo en estudio, en el rango desde 0 – 200km de distancia epicentral. A partir de los 350km la predicción mejora parcialmente, los niveles de acierto son muy bajos por lo que se propone revisar estas

curvas aprovechando la mayor cantidad de datos sísmicos actuales.

Se recomienda que la ecuación de Gomez-Ordaz-Tena-1 (GOT1) se use con valores de " r " \geq 2km, la de Gomez-Ordaz-Tena-2 (GOT2) se use con valores de " r " \geq 50km, la de Ordaz-Jara-Singh (OJS) se use con valores de " r " = 4 > km y la ley de Singh (Si) se use a partir de " r " = 40km.

La mayoría de leyes de atenuación están por encima del 80% de error relativo en el rango de distancias entre 80 y 350 Km. La curva Grases 2 reduce su error relativo a partir de los 250 Km y la curva Aguiar 2 a partir de los 300 Km.

La curva que más se acerca a CMAR7 (curva que representa la envolvente de las aceleraciones registradas en el sismo en estudio) es Gomez – Ordaz – Tena 2 (GOT 2), la misma que tiene un error relativo del 50-60% entre 50 – 350 Km, a los 500 Km el error relativo desciende hasta el 25%, lo que la convierte en la curva más eficiente para predecir las aceleraciones máximas del sismo en estudio.

REFERENCIAS

Martinez, S. (2007). Ecuaciones de Atenuacion vs acelerograficos.

<http://cidbimena.desastres.hn/docum/crid/Septiembre2007/CD3/pdf/spa/doc15939/doc15939-a.pdf>.

Aguiar, R. (2000). *Analisis Sismico de Edificios*. <http://publiespe.espe.edu.ec/investigativas/rman/c1b2c.htm>.

Chavez, I. A. (2010). Ley de Atenuación de aceleraciones PGA.

<http://www.geociencias.unam.mx/~ramon/alejandro.pdf>. UNAM.

Gómez, S. C., Ordaz, M., Tena, C. (2005). *Leyes de atenuación en desplazamiento y aceleración para el diseño sísmico de estructuras con aislamiento en la costa del Pacífico*. XV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica.

https://www.researchgate.net/publication/259487921_Leyes_de_atenuacion_en_desplazamiento_y_aceleracion_para_el_diseño_sismico_de_estructuras_con_aislamiento_en_la_costa_del_Pacifico.

United States Geological Survey USGS (2012). USGS Science for a changing world. Magnitude 7 and Greater Earthquakes in 2011. http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/year/2011/2011_stats.php.

DG Deganadores, U. (2011). Sismo de 7,1 grados escala de Richter con Alerta de Tsunami sacudió la Costa Noreste de Honshu – Japón.

http://www.deganadores.com/index.php?option=com_content&view=article&id=579:terremoto-en-japon-7-abril-2011-sismo-71-grados-escala-de-richter&catid=122:nuestra-tierra&Itemid=80.

Center for Engineering Strong Motion Data CESMD. (2011). USGS-CESMD Internet Data Reprot. 07 Apr 2011 Japanese Earthquake, http://strongmotioncenter.org/cgi-bin/CESMD/iqr_dist_DM2.pl?IQRID=Japan_07Apr2011_113241UTC&SFlag=0&Flag=2.

Este documento debe citarse como: Moncayo Theurer, M., Velasco, G., Rodríguez, J., Terán (2016). **Análisis comparativo entre 13 leyes de atenuación y los registros de un sismo de grado 7.1 en magnitud Richter ocurrido en Japón** Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 20-3, pp. 137-146