

UNIVERSIDAD

CATÓLICA ANDRÉS BELLO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA

CIVIL



**ANALISIS DE LA INTENSIDAD DEL SECTOR FUERTE DEL ACELEROGRAMA
PARA ESTABLECER EL POTENCIAL DE LICUACION**

Nombre del Tutor:

Ing. Heriberto Echezuría

Prestadores:

Herrera M. Darwin A.

C.I: 20.616.116

Muñoz M. Harold R.

C.I: 22.540.443

Caracas, 08 de junio del 2018

UNIVERSIDAD

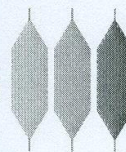
CATÓLICA ANDRÉS BELLO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA

CIVIL

UCAB



Universidad Católica
ANDRÉS BELLO

Escuela de Ingeniería Civil

**ANÁLISIS DE LA INTENSIDAD DEL SECTOR FUERTE DEL
ACELEROGRAMA PARA ESTABLECER EL POTENCIAL DE LICUACION**

Este Jurado; una vez realizado el examen del presente trabajo ha evaluado su contenido con
el resultado: Veinte (20) puntos

JURADO EXAMINADOR

Firma:

HERIBERTO ECHEZURÍA

Nombre:

Firma:

Nombre: Álvaro Boticco

Firma:

Nombre: Adriano Brancaccio

Nombre del Tutor:

Ing. Heriberto Echezuría



Prestadores:

Herrera M. Darwin A.

C.I: 20.616.116

Muñoz M. Harold R.

C.I: 22.540.443

Caracas, 04 de julio del 2018

Harold R. Muñoz M.

A DIOS sobre todas las cosas, por ser la fuente de inspiración en mi vida y la luz que guía mi camino.

A mi familia, en especial a mis padres porque gracias a sus esfuerzos hoy estoy donde estoy, por su amor y apoyo incondicional que me motivaron y me dieron fuerzas a llegar donde estoy.

A mis amigos de Ingeniería Civil, que me han acompañado en este recorrido y a quienes les debo experiencias y momentos inolvidables.

A mis amigos de toda la vida que me brindaron su apoyo y compañía durante todo este estudio.

A nuestro tutor, el Ing. Heriberto Echezuria, por ser un excelente guía para la elaboración de este trabajo de investigación.

Darwin A. Herrera M.

A Dios por darme la oportunidad de vivir esta gran experiencia

A mis padres, los cuales fueron fuente de inspiración para la culminación de mi carrera.

A mis amigos conocidos en la carrera, ya que fueron mis compañeros de estudios y espero sean mis futuros socios.

Capítulo 1.....	1
1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivo general.....	2
1.2.2 Objetivos específicos	2
1.3 Justificación	3
1.4 Alcance y limitaciones	3
Capítulo 2 Marco Teórico.....	4
2.1 Terremotos y fallas	4
2.1.1 Tipos de Fallas Geológicas	4
2.1.2 Foco y epicentro.....	7
2.2 Sismicidad.....	9
2.2.1 Medición de las dimensiones sísmicas	10
2.2.2 Escalas de intensidad	10
2.2.3 Escala de Magnitud.....	11
2.2.4 Leyes de atenuación	12
2.3 Movimiento fuerte del Terreno	13
2.3.1 Método de Arias.....	18
2.3.2 Análisis del a_{rms} y T_{sm} de funciones periódicas individuales y obtenidas con los criterios de Fourier	24
2.3.3 Potencial de licuación utilizando la intensidad del sector fuerte del sismo	27
Capítulo 3 Marco Metodológico.....	31
3.1 Los Acelerogramas en Roca	31
3.2 Intensidad del sector fuerte	31
3.3 Ley de Atenuación	32
3.3.1 Regresion Multiple No Lineal	33
3.4 Acelerogramas en Superficie	35
3.4.1 Programa DeepSoil	36

3.4.2 Perfil del suelo	40
3.4.3 Intensidades en superficie	42
3.5 Energía necesaria para obtener la licuación de arenas	44
3.6 Comparación de las intensidades de los sismo con CSR.....	45
Capítulo 4 Presentación y Análisis de Resultados	48
4.1 Intensidades en Roca.....	48
4.2 Relación de las aceleraciones pico en las dos direcciones del sismo	49
4.3 Resultados de la Ley de Atenuación	52
4.4 Análisis de Intensidades en Roca y en superficie	56
4.4.1 Treasure Island.....	56
4.4.2 Perfil de Treasure Island modificado con $V_s=100$ m/s.....	58
4.4.3 Perfil de Treasure Island modificado con $V_s=350$ m/s.....	60
4.4.4 Análisis de susceptibilidad a la licuación considerando el CSR y la intensidad, la duración y los espectros en superficie	61
4.5 Resultados con Sismo en Superficie y CSR	67
Conclusiones	69
Bibliografía	70
Apéndice	72

Índice de tablas

vii

Tabla 1 Equivalencia entre la escala de magnitud Richter y la de intensidad de Mercalli (Boiero A, 2009)	12
Tabla 2 Leyes de atenuación empleadas en Venezuela (FUNVISIS, 2016).....	13
Tabla 3 Intensidades y aceleraciones en Teasure Island.....	42
Tabla 4 Intensidades y aceleraciones en Suelo con Vs100.....	43
Tabla 5 Intensidades y aceleraciones en Suelo con Vs350.....	44
Tabla 6 Modelos de curvas para regresión	53
Tabla 7 Variación de Intensidad roca-Superficie. Perfil Treasure Island	56
Tabla 8 variación de Intensidad roca-Superficie. Perfil Vs 100	59
Tabla 9 variación de Intensidad roca-Superficie. Perfil Vs 300. Sismos adicionales.....	60
Tabla 10 variación de Intensidad roca-Superficie. Perfil Vs 350	60
Tabla 11 Promedios de las aceleraciones espectrales de los 3 perfiles junto con su duración de la intensidad (método Echezuria)	62
Tabla 12 Resultados de CSR corregido por Treasure Island	68

Índice de figuras

Figura 1 Falla transcurrente (Kramer, 1996)	5
Figura 2 Falla Normal (Kramer, 1996)	6
Figura 3 Falla Inversa (Kramer, 1996)	6
Figura 4 Componentes de una falla (Kramer, 1996).....	7
Figura 5 Descripción de la localización del terremoto (Kramer, 1996)	8
Figura 6 Distintas medidas de distancias en un sismo (Kramer, 1996)	9
Figura 7 aceleraciones máximas similares pero con distintas duraciones (Kramer, 1996)	14
Figura 8 Definición del sector fuerte del sismo (Kramer, 1996)	14
Figura 9 Proceso de desratización de un registro de aceleraciones sísmicas para un intervalo de tiempo de $\Delta t=0,1$ s (Echezuria, 2017).....	15
Figura 10 Comparación de los a_{rms} , T_{sm} e I_{sm} obtenidos con las definiciones de duración TB y B.....	17
Figura 11 Estructura sometida a una fuerza lateral. (Universidad de Alicante, 2014)	18
Figura 12 Intensidad de Arias Intensity para el sector fuerte de 83 registros de	21
Figura 13 Comparaciones de las duraciones en segundos obtenidas con las cuatro definiciones de duración, para 83 registros de 18 sismos con Mm entre 5 y 7,7. (Echezuria, 2017)	22
Figura 14 Comparaciones de los errores medios cuadráticos de aceleración	23
Figura 15 Función periódica de aceleración indicando la amplitud máxima y la duración del sector fuerte del acelerograma. (Echezuria, 2017).....	25
Figura 16 Función compleja con sector fuerte bien definido con transición gradual hacia el resto del acelerograma (Echezuria, 2017)	26
Figura 17 Valores de a_{rms} , a_{rms2} e I_{sm} de una función compleja sector fuerte bien definido y transición a la zona con aceleraciones bajas, muy similar a un acelerograma. (Echezuria, 2017)	26
Figura 18 Variación de los valores de I_{sm} de la definición de TB de duración de movimiento fuerte con magnitud y distancia para los registros de aceleración. (Echezuria, 2017)	28
Figura 19 Valores estimados de I_{sm} para inducir licuefacción. (Kramer, 1996)	29

Figura 20 Variación de I_{sm} con magnitud y distancia, incluidos los valores de umbral I_{x} estimados obtenidos de pruebas de laboratorio y respuesta de suelo blando utilizando los valores de amplificación recomendados por Idriss. (Echezuria, 2017)	30
Figura 21 Datos para la Ley de Atenuación.....	33
Figura 22 Relación entre la distancia epicentral en la cual ocurre licuación con respecto a la magnitud de momento. (Kramer, 1996).....	35
Figura 23 Sismos Escogidos	36
Figura 24 Tipos de estudios realizados en DeepSoil	36
Figura 25 Datos del perfil	37
Figura 26 Detalles del perfil	37
Figura 27. Selección del sismo en formato .txt.....	38
Figura 28 Sismo cargado correctamente.....	38
Figura 29 Frecuencia independiente	39
Figura 30 Análisis de control.....	39
Figura 31. Análisis de respuesta del sismo	40
Figura 32 Perfil del Suelo Treasure Island. Profundidad 92m.....	41
Figura 33. Perfil Predeterminado de V_{s100}	41
Figura 34. Perfil Predeterminado de V_{s350}	42
Figura 35 Valores Limites de Intensidad para Licuación	45
Figura 36 Factor de reducción con respecto a la profundidad. (Kramer, 1996)	45
Figura 37 Factor de CSR con $CSR_{7.5}$. (Kramer, 1996).....	46
Figura 38. Curva para factor CSR a $CSR_{7.5}$	46
Figura 39 Relación entre el esfuerzo cíclico con respecto al $N_{1,60}$ del perfil para estimar licuación. (Kramer, 1996)	47
Figura 40 Comparación entre Bolt y Echezuria. Magnitudes entre 5-8	49
Figura 41 Comparación entre Bolt y MCann. Magnitudes entre 5-8	49
Figura 42 Comparación entre MCann y Echezuria. Magnitudes entre 5-8	49
Figura 43 Comparación de cocientes de Intensidades con cocientes de aceleraciones máximas del terreno para M 5-5.9	50
Figura 44 Comparación apico con intensidad mayor M 6-6.9.....	51

Figura 45 Comparación apico con intensidad mayor M 7-7.9.....	51
Figura 46 Ism Vs Distancia epicentral. Magnitud 5-7.9.....	52
Figura 47 Magnitud 5-5.9 con desviación	54
Figura 48 Magnitud 6-6.9 con desviación	54
Figura 49 Magnitud 7-7.9 con desviación	55
Figura 50 Ley de atenuación con mejor ajuste para medias de magnitudes 5, 6 y 7, respectivamente.....	55
Figura 51 Intensidad en Superficie Vs Intensidad en Roca	57
Figura 52 Aceleración pico super Vs Aceleración pico roca. Treasure Island	58
Figura 53 Aceleración en pico super. Vs 100	59
Figura 54 Aceleración en pico super. Vs 350	61
Figura 55 Espectros en Roca de los 13 sismos a evaluar.....	63
Figura 56 Espectro en Superficie, Treasure Island. Periodo fundamental 1,53 seg	63
Figura 57 Espectro en Superficie, Vs 100. Periodo fundamental 3,68 seg.....	64
Figura 58 Espectro en Superficie, Vs 350. Periodo fundamental 1,05 seg.....	64
Figura 59 Espectro en Roca, Vs 100. Periodo fundamental 3,68 seg. Sismo adicional	65
Figura 60 Espectro en Superficie, Vs 100. Periodo fundamental 3,68 seg. Sismo adicional	66
Figura 61 Correlación entre PSA Vs Tiempo de Duración con división de zonas que licuan de las que no licuan	67
Figura 62 Comparación entre CSR y la energía real del sismo para producir licuación	68

Capítulo 1

1.1 Planteamiento del problema

Podemos definir a un sismo como un movimiento vibratorio de la tierra, producido por cierta liberación de energía a causa del deslizamiento de las placas tectónicas a lo largo de una falla. Existen diversos tipos de sismos, unos más destructivos que otros, todo esto debido a la intensidad del movimiento sísmico que presente dicho desplazamiento.

En este TEG se realiza un estudio sobre algunos factores importantes de los sismos, tales como la duración del sector fuerte del mismo, la intensidad de dicho sector fuerte y su atenuación con la distancia. De la misma manera, se evalúa la influencia de la intensidad del sector fuerte del sismo en la licuación de arenas.

Para la ejecución del TEG fue necesario generar una base de datos de 107 sismos en roca para magnitudes de momento desde 5 hasta 7,6, los cuales se obtuvieron de las bases de datos internacionales que tienen sismos mundiales digitalizados. Estos se presentan en los apéndices 1, 2 y 3. A cada uno de estos sismos se les estima el sector fuerte con las tres definiciones descritas y la intensidad de cada uno de dichos sectores fuertes. Luego, se define la ley de atenuación aplicable a las intensidades del sector fuerte de los acelerogramas en roca

La capacidad de daño de un sismo depende de su magnitud, distancia desde la fuente y duración del sector fuerte del mismo. Los acelerogramas de los sismos en estudio fueron seleccionados para cubrir adecuadamente estas variables. Es decir, las magnitudes fueron escogidas bien distribuidas en el espacio y de fuentes similares a las presentes en Venezuela y California. De esta manera es posible asegurar que se espera la misma distribución para las duraciones y el sector fuerte de los acelerogramas.

Para definir el sector fuerte del sismo, el cual evalúa la fase en la que el sismo presenta su máximo potencial, se utilizaron las definiciones de duración dadas por Bolt (B), McCann-Shah (1980) y una más reciente de Echezuría (E). La primera de estas está

definida en función de un valor umbral de la aceleración (0,05 g) mientras que las otras dos utilizan las estadísticas de las aceleraciones vía el error medio.

Como parte del estudio se evalúa la respuesta dinámica de varios perfiles geotécnicos para comparar el cambio de intensidad en la roca y en la superficie de los mismos. A su vez, estos perfiles son seleccionados con estratos de arenas sueltas en los primeros 20 m de profundidad, lo cual los hace susceptibles a licuación con los 13 sismos de distintas magnitudes utilizados para esta parte del estudio. Estos sismos se indican en la figura 59.

Una vez procesados los estudios de dichos acelerogramas las distintas definiciones de duración se realiza la comparación de las intensidades de sus sectores fuertes en superficie y en roca para diferentes densidades relativas de las arenas en el perfil, lo cual nos permite satisfacer la evaluación práctica de la implementación de factores relacionados con la capacidad potencial de licuar de un suelo. De esta manera es posible evaluar cuan apegados a la realidad resultan los gráficos existentes para estimación del potencial de licuación basados en la razón de esfuerzo cíclico (CSR) definida por Seed e Idriss (1981) la cual solamente se corrige por magnitud (Kramer 1996).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Cambio de la aceleración máxima del suelo (PGA) por la intensidad del sector fuerte del sismo (I_{sm}) para establecer la demanda con base a las características de la provincia sísmica en la evaluación del potencial de licuación.

1.2.2 Objetivos específicos

- Comparar el I_{sm} del sismo en roca y superficie de un perfil de arena para 3 condiciones de densidad relativa, para 12 sismos seleccionados con base a magnitud y distancia.
- Establecer los valores de densidad relativa para los cuales ocurre licuación considerando la variación del I_{sm} con magnitud y distancia.

- Evaluar la existencia de equivalencias entre la relación de esfuerzos cíclicos (CSR) e I_{sm} para modificar los gráficos de potencial de licuación.

1.3 Justificación

Se establecerá una diferencia de intensidades del sector fuerte del sismo en roca y en perfiles, cuyo análisis serán a las distintas distancias en donde ha ocurrido licuación para distintas magnitudes. Se aplicaran estudios según bases de datos ya establecidos y así demostrar que el CSR se ha desarrollado con procedimientos indirectos que infieren a la energía que transmite el sismo a partir de correlaciones con la aceleración máxima del terreno y número de ciclos equivalentes que se ajustan según ensayos de laboratorio. Se estudiara además que la energía del sismo depende de cómo afecta el perfil al contenido de energía de las distintas componentes de frecuencia del sismo, lo cual no se considera en el método del CSR.

1.4 Alcance y limitaciones

- Se estudiara la intensidad del sector fuerte del acelerograma.
- Los perfiles geotécnicos serán homogéneos y preferiblemente de un sitio que haya licuado con sismos.
- Los sismos que se usaran para el estudio serán de magnitudes entre 5 y 8.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1 Terremotos y fallas

La energía liberada por las explosiones atómicas o por las erupciones volcánicas puede producir un terremoto pero esos acontecimientos son relativamente débiles e infrecuentes. Existen muchas pruebas de que la Tierra no es un planeta estático. Sabemos que la corteza terrestre se ha levantado en algunas ocasiones, porque hemos encontrado numerosas plataformas de erosión marina antiguas muchos metros por encima del nivel de las mareas más elevadas. Otras regiones muestran evidencias de subsidencia extensa. Además de estos desplazamientos verticales, los desplazamientos de vallas, carreteras y otras estructuras indican que el movimiento horizontal es también común. Estos movimientos suelen estar asociados con grandes estructuras de la corteza terrestre denominadas fallas.

Normalmente, los terremotos se producen a lo largo de fallas preexistentes que se formaron en el pasado lejano a lo largo de zonas de fragilidad de la corteza terrestre. Algunas de ellas son muy grandes y pueden generar grandes terremotos. Un ejemplo es la falla de San Andrés, que es un límite de falla transformante que separa dos grandes secciones de la litosfera terrestre: la placa Norteamericana y la placa del Pacífico. Esta extensa zona de falla tiene una dirección noroeste durante cerca de 1.300 kilómetros, a través de gran parte del oeste de California. (Edward J. Tarbuck, 2005)

2.1.1 Tipos de Fallas Geológicas

Las fallas geológicas son estructuras muy comunes en la corteza terrestre, en Venezuela existen varias de ellas formando complejos sistemas, sobresaliendo en importancia las fallas que constituyen el contacto entre la placa de Sur América y la placa del Caribe, así como también podemos indicar como representativas en todo el planeta tierra las fallas presentes en el estado de California, Estados Unidos. Se trata de las fallas de **San Andrés, San Jacinto, Imperial y Elsinore**, las cuales han provocado más de la mitad de los terremotos de mayor intensidad que han ocurrido en el sur de California y

las cuales se concentran en una región que los científicos han denominado como “**el gran recodo**”.

Se considera una falla activa si existen evidencias de desplazamientos durante los últimos 500.000 años o evidencia de un único desplazamiento en los últimos 35.000 años.

Según el criterio de varios científicos, una falla se considera inactiva cuando han transcurrido 10.000 años de inactividad; mientras que otras instituciones como la U.S Army Corps para el diseño de represas asigna un valor de 35.000 años. (Sauter, 1989).

El período de actividad de la misma es tan solo un indicador de si la falla se encuentra activa o no, pero no es el único; otros parámetros a considerar son la longitud de los deslizamientos en las zonas de contacto entre las placas, la longitud de la ruptura, la frecuencia de estos eventos; entre otros.

El tipo de movimiento que ocurre en una falla se reduce generalmente a los componentes en la dirección del desplazamiento y su profundidad, definido como rumbo y ángulo de buzamiento. El desplazamiento de la roca puede ser horizontal, vertical o combinado. Se definen tres tipos de fallas:

- *Falla Transcurrente*: En este tipo de falla los desplazamientos son horizontales, por lo que los bloques se mueven lateralmente uno con respecto del otro. Se considera también un tipo de falla transcurrente la falla de transformación ubicadas en los ejes de las dorsales en las cordilleras centro oceánicas.

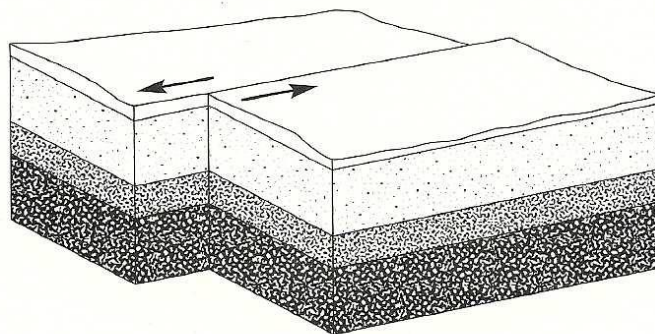


Figura 1 Falla transcurrente (Kramer, 1996)

- *Falla Normal:* Ocurre cuando el bloque que se encuentra por encima del plano de falla se ha desplazado hacia abajo, relativo al bloque por debajo del plano. Otro movimiento asociado al movimiento normal es la falla de empuje, cuando el plano de falla tiene un pequeño ángulo de inmersión.

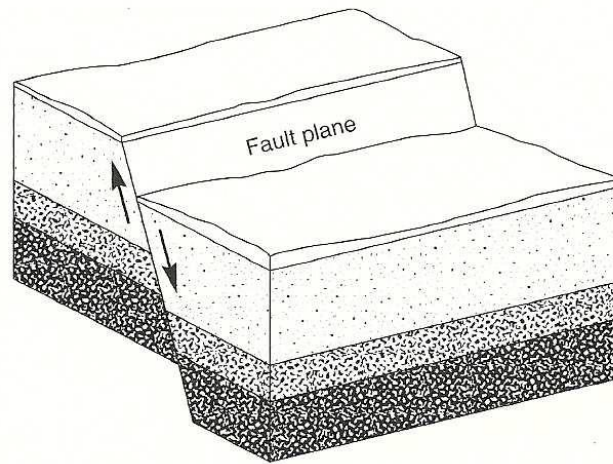


Figura 2 Falla Normal (Kramer, 1996)

- *Falla Inversa:* En esta falla el bloque superior se desliza hacia arriba respecto al bloque inferior, producto de la tensión en que se encuentra sometidos ambos bloques perpendiculares a la falla. (Udíás, 2009)

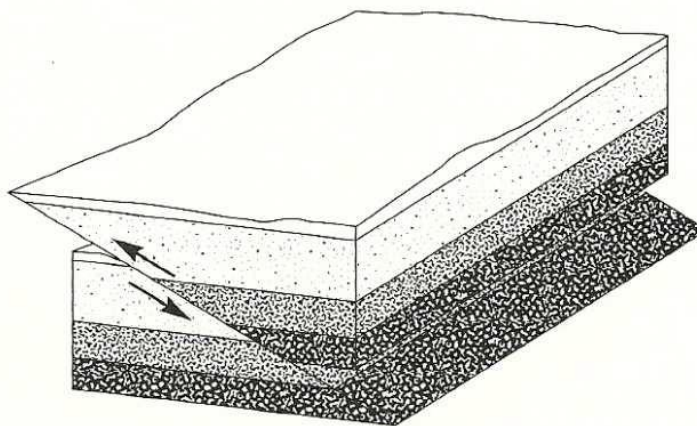


Figura 3 Falla Inversa (Kramer, 1996)

Cabe destacar la importancia que tienen los componentes que presenta una falla, para así tener características específicas de esta a la hora de la realización de estudios en el sitio y otros aspectos. En la Figura 4 se muestran los componentes de una falla los cuales son: El plano horizontal (Horizontal plane), el plano de falla (Fault plane), el buzamiento (Dip) y el rumbo (Strike).

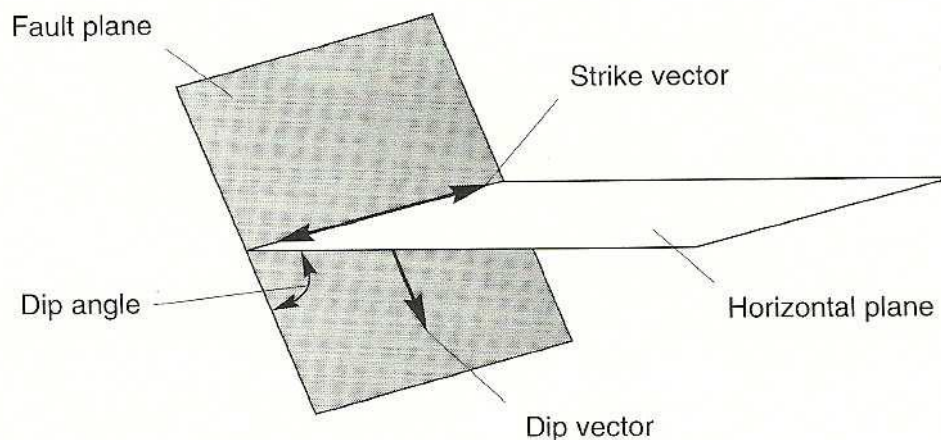


Figura 4 Componentes de una falla (Kramer, 1996)

2.1.2 Foco y epicentro

El foco de un terremoto es el punto donde la falla se rompe para causarlo. En cierto sentido se podría considerar la "zona cero" del terremoto, el punto en el que la primera piedra se desplaza para que el terremoto ocurra. Las ondas sísmicas se propagan hacia fuera desde el foco en todas las direcciones. A medida que estas ondas sísmicas viajan a lo largo o llegan a la superficie de la tierra, causan el temblor que se siente. Las más rápidas ondas P llegan primero, pero las ondas de superficie más lenta llegan poco después, en realidad causan más daño.

El epicentro es el punto en la superficie de la tierra que se encuentra sobre la proyección vertical del hipocentro o foco, el punto del interior de la tierra en el que se origina un terremoto.

El epicentro es usualmente el lugar con mayor daño sin embargo, en el caso de grandes terremotos, la longitud de la ruptura de la falla puede ser muy grande, por lo que el mayor daño puede localizarse no en el epicentro, sino en cualquier otro punto de la zona de ruptura.

Conociendo esto podemos definir como lo vemos en la figura 5 que la zona donde comienza la rotura se llama foco o hipocentro y su proyección en la superficie se denomina epicentro.

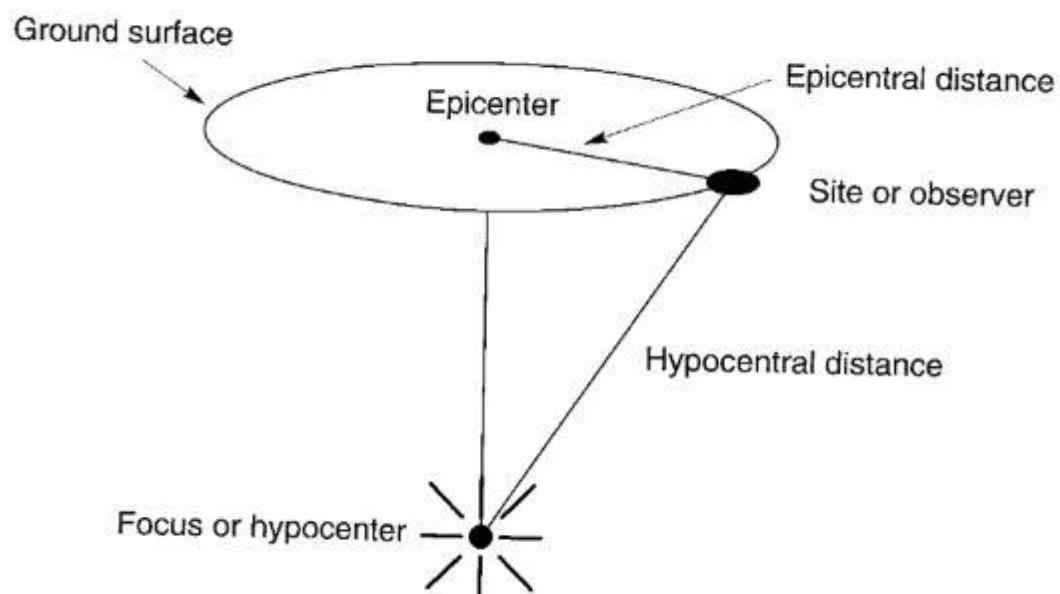


Figura 5 Descripción de la localización del terremoto (Kramer, 1996)

Gracias a estos hallazgos podemos concluir donde están ubicadas las zonas donde el suelo presenta esfuerzos mayores a la hora de que se presenta un sismo y definir así a que distancia ocurren estas rupturas, que no siempre coinciden con el hipocentro como lo veremos en la Figura 6 a continuación

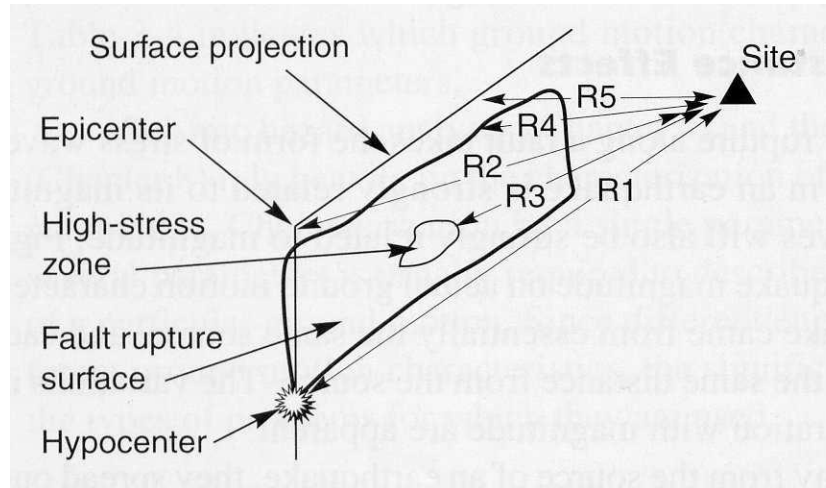


Figura 6 Distintas medidas de distancia en un sismo (Kramer, 1996)

2.2 Sismicidad

Entendemos como sismicidad al estudio de los sismos que ocurren en algún lugar determinado. Según sea el lugar de ocurrencia podemos relacionar a un sismo de baja o alta sismicidad. Un estudio de sismicidad es aquel que muestra un mapa con los epicentros y el número de sismos que ocurren en algún período. La sismicidad tiene ciertas leyes. Una de las más usadas es la ley de Charles Francis Richter que relaciona el número de sismos con la magnitud.

La ciencia que se encarga del estudio de los sismos, sus fuentes y de cómo se propagan las ondas sísmicas a través de la Tierra recibe el nombre de sismología. Las zonas de mayor sismicidad se relacionan con los límites de las placas tectónicas.

Para el estudio de la amenaza y vulnerabilidad sísmica, es importante determinar la sismicidad de la zona a estudiar. De esta forma se considera la influencia de las fuentes sismogénicas para calcular los parámetros sísmicos de la zona: magnitud, recurrencia sísmica, relación de magnitud-longitud de ruptura, y la atenuación del movimiento del terreno. Con estos parámetros se efectúa una evaluación probabilística de la amenaza sísmica y se obtiene un valor máximo del movimiento fuerte del terreno, con una probabilidad de excedencia dada y un tiempo determinado de vida útil para una obra civil a ejecutar. (Boiero A, 2009).

2.2.1 Medición de las dimensiones sísmicas

Históricamente los sismólogos han utilizado varios métodos para obtener dos medidas fundamentalmente diferentes que describen el tamaño de un terremoto: la intensidad y la magnitud. La primera que se utilizó fue la intensidad, una medición del grado de temblor del terreno en un punto determinado basada en la cantidad de daños. Con el desarrollo de los sismógrafos, se hizo evidente que una medición cuantitativa de un terremoto basada en los registros sísmicos era más conveniente que los cálculos personales inexactos. La medición que se desarrolló, denominada magnitud, se basa en los cálculos que utilizan los datos proporcionados por los registros sísmicos (y otras técnicas) para calcular la cantidad de energía liberada en la fuente del terremoto.

Tanto la intensidad como la magnitud facilitan una información útil, aunque bastante diferente, sobre la fuerza del terremoto. Por consiguiente, ambas medidas todavía se utilizan para describir las dimensiones relativas de los terremotos.

2.2.2 Escalas de intensidad

Mediante la cartografía sistemática de los efectos del terremoto, se estableció una medida de la fuerza y la distribución del movimiento del suelo. Para estandarizar el estudio de la gravedad de un terremoto, los investigadores han desarrollado varias escalas de intensidad que consideraban el daño provocado en los edificios, así como descripciones individuales del acontecimiento, y los efectos secundarios, como deslizamientos y la extensión de la ruptura del suelo.

En 1902 el sismólogo italiano Giuseppe Mercalli, no se basa en los registros sismográficos sino en el efecto o daño producido en las estructuras y en la sensación percibida por la gente. Para establecer la Intensidad se recurre a la revisión de registros históricos, entrevistas a la gente, noticias de los diarios públicos y personales, etc.

La Intensidad puede ser diferente en los diferentes sitios reportados para un mismo terremoto (la Magnitud Richter, en cambio, es una sola) y dependerá de

- a) La energía del terremoto,
- b) La distancia de la falla donde se produjo el terremoto,

c) La forma como las ondas llegan al sitio en que se registra (oblicua, perpendicular, etc.)

d) Las características geológicas del material subyacente del sitio donde se registra la Intensidad y, lo más importante,

e) Cómo la población sintió o dejó registros del terremoto.

Aunque cada terremoto tiene una magnitud única, su efecto variará grandemente según la distancia, la condición del terreno, los estándares de construcción y otros factores, en la Tabla 1 observaremos la comparación entre la magnitud referida a Richter y la intensidad según Mercalli y así conocer la relación en cuanto a cada uno de los tipos de medidas de los sismos.

Es importante destacar que estas escalas son medidas con base en daños establecidos presentados a lo largo de la historia del planeta tierra o también con parámetros representativos del sismo como la aceleración máxima del terreno o la intensidad del sector fuerte del sismo.

2.2.3 Escala de Magnitud

Magnitud de momento (MW)

Con el fin de evitar la saturación de las escalas, Kanamori (1977) introdujo una escala de magnitudes basada en la relación: $\log E_s = 4.8 + 1.5 M_S$ (Joule = Nm), con E_s = Energía, con lo cual sigue: $\log M_0 = 1.5 (M_S) + 9.1$. Reemplazando M_S por M_W se obtiene:

$$M_W = 2/3 \log M_0 - 6.07$$

M_0 = Momento sísmico, se determina a partir del espectro de amplitudes para bajas frecuencias o por la observación sobre el terreno del área de la falla y su desplazamiento.

La escala de magnitudes es una escala logarítmica para medir la dimensión de un terremoto, introducido por Richter en 1935. La magnitud de momento, M_w , máxima observada hasta la fecha ha sido del terremoto de Chile de 1960 ($M_w \approx 9.5$; Kanamori 1977); las magnitudes pequeñas pueden tener valores negativos.

Finalmente podemos establecer una comparación según la escala de Richter y la de Mercalli para conocer más a detalle las características representativas de estos dos estudios.

Tabla 1 Equivalencia entre la escala de magnitud Richter y la de intensidad de Mercalli (Boiero A, 2009)

Escala de magnitud Richter (M)		Escala de intensidad de Mercalli (MMI)	
2,5	En general no sentido, pero registrado en sismógrafos.	I	Casi nadie lo ha sentido.
		II	Muy pocas personas lo han sentido.
3,5	Sentido por mucha gente	III	Tembor notado por mucha gente que, sin embargo no suele darse cuenta de que es un terremoto.
		IV	Se ha sentido en el interior de los edificios por mucha gente. Parece que un camión ha golpeado la edificación.
		V	Sentido por casi todos, mucha gente se despierta.
4,5	Pueden producirse algunos daños locales pequeños.	VI	Sentido por todos, mucha gente corre fuera de los edificios. Los muebles se mueven y pueden producirse algunos daños.
		VII	Todo el mundo corre fuera de las edificaciones. Las estructuras mal construidas quedan muy dañadas.
6,0	Terremoto destructivo.	VIII	Las construcciones correctamente diseñadas se dañan ligeramente. Las otras se derrumban.
7,0	Terremoto importante.	IX	Todos los edificios son muy dañados. Grietas apreciables en el suelo.
		X	Muchas construcciones destruidas. Suelo muy agrietado.
8,0	Grandes Terremotos	XI	Derrumbe de casi todas las construcciones. Puentes destruidos. Grietas muy amplias en el suelo.
		XII	Destrucción Total. Se ven ondulaciones sobre la superficie del suelo.

2.2.4 Leyes de atenuación

Las leyes de atenuación se utilizan para estimar el nivel de movimiento del suelo en el sitio de interés ante la ocurrencia de un sismo con cierta magnitud. Para definir la

ley de atenuación a utilizar en un estudio de amenaza, debe tomarse en cuenta la fuente con mayor incertidumbre.

A continuación, se muestran algunas leyes de atenuación utilizadas en Venezuela.

Tabla 2 Leyes de atenuación empleadas en Venezuela (FUNVISIS, 2016)

Autor	Ley de Atenuación
FUNVISIS Occidente y Centro	$\ln(a) = 4,48 + 0,53M - 1,56\ln(R + 15)$
FUNVISIS Oriente	$\ln(a) = 4,87 + 0,96M - 1,56\ln(R + 25)$
INTEVEP Occidente y Centro	$\ln(a) = 5,40 + 0,36M - 0,861\ln(R + 10)$
INTEVEP Oriente	$\ln(a) = 3,75 + 0,47M - 0,57\ln(R + 10)$

Es importante destacar que aunque se presenten leyes como las establecidas en la tabla anterior para estimar dicho movimiento de suelo en estudio, no existen leyes para la intensidad del sector fuerte del sismo, es por eso que mediante nuestros estudios y resultados se definirá una ley para dicho sector del sismo similares a las que se presentan en dicha tabla.

2.3 Movimiento fuerte del Terreno

Los sismos son parte importante del desarrollo principal de una sociedad estructural, ya que estos nos permiten establecer parámetros de seguridad de manera en que se creen mecanismos de prevención en contra de estos, es por ello que estableceremos todas las características necesaria que nos permitan definir todos esos aspectos del sismo que son importantes para el estudio.

Un **acelerograma** es una representación temporal de la aceleración que experimenta el suelo en un determinado punto durante un terremoto.

Sabemos que la aceleración pico de un acelerograma no es una medida confiable de su capacidad de acumular daños debido a que no toma en consideración la duración

del terremoto, en particular, la del sector fuerte del mismo. Esto se ilustra en la Figura. 7. En la misma se incluyen dos registros de aceleraciones con la misma aceleración máxima o pico pero con diferentes duraciones. Es evidente que el sismo de la derecha en dicha figura tendrá una mayor capacidad de acumular daño en las estructuras o en el suelo que el de la izquierda (Echezuria, 2017).

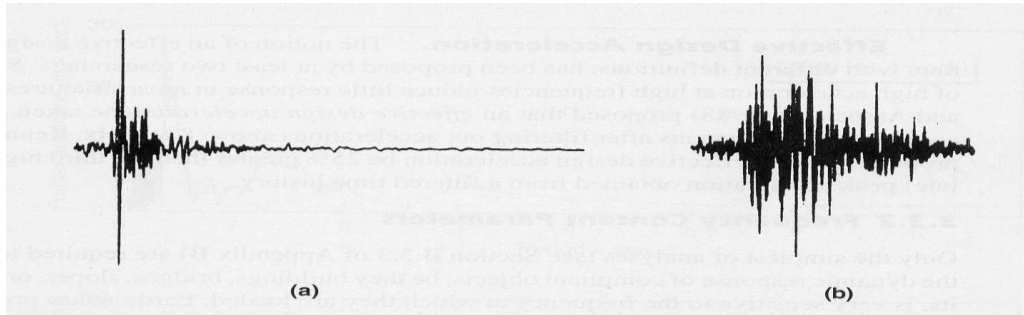


Figura 7 aceleraciones máximas similares pero con distintas duraciones (Kramer, 1996)

Los registros de las aceleraciones ocurridas durante un sismo pueden variar dependiendo de variables tales como, magnitud, distancia y condiciones locales o de sitio.

Es importante establecer el sector fuerte de los acelerogramas ya que esta es una de los aspectos más importantes que podemos extraer de un acelerograma debido a que nos permite conocer el periodo en el que el sismo presenta su máximo potencial.

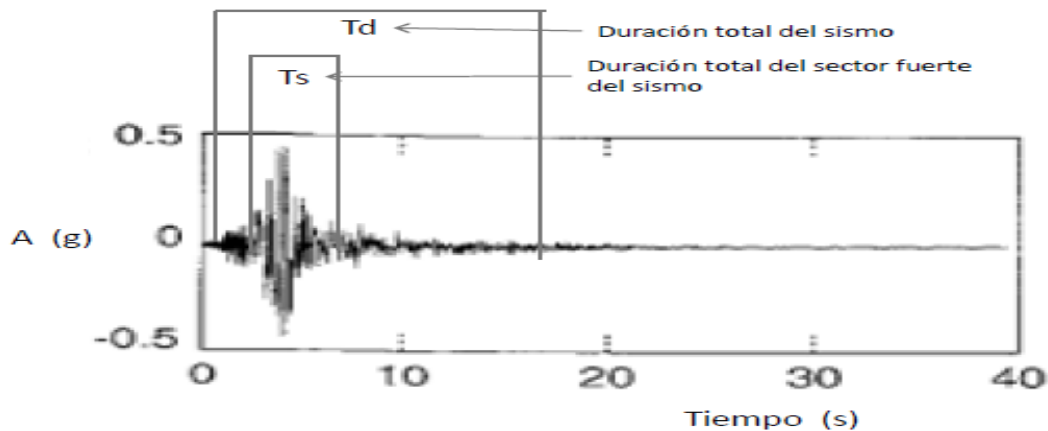


Figura 8 Definición del sector fuerte del sismo (Kramer, 1996)

Es por ello que cuando se desea considerar la energía del sismo se recurre a la magnitud ya que con esta última se puede establecer un número de ciclos de amplitud equivalente. El problema está en que las características de los acelerogramas de una misma magnitud cambian con la distancia y al tratar de establecer los ciclos únicamente con la magnitud también se presentan limitaciones. Por ello, es necesario también definir la duración de la sección del acelerograma capaz de acumular daños. Para eso se ha convenido en utilizar lo que se denomina el sector fuerte del acelerograma. Como hemos dicho, de esa manera la intensidad del sector fuerte queda completamente definida y sería la energía que aporta el sector fuerte del acelerograma.

Para la definición de la energía se utiliza el error medio cuadrático a_{rms} del sector fuerte del acelerograma. Este parámetro viene dado por la desviación estándar del acelerograma cuando el mismo es considerado como un proceso aleatorio estacionario (con media igual a cero), lo cual es una práctica común en ingeniería sísmica.

En la Figura 9 se ilustra el proceso de digitalización de una señal sísmica como la aceleración para determinar su error medio cuadrático de la misma.

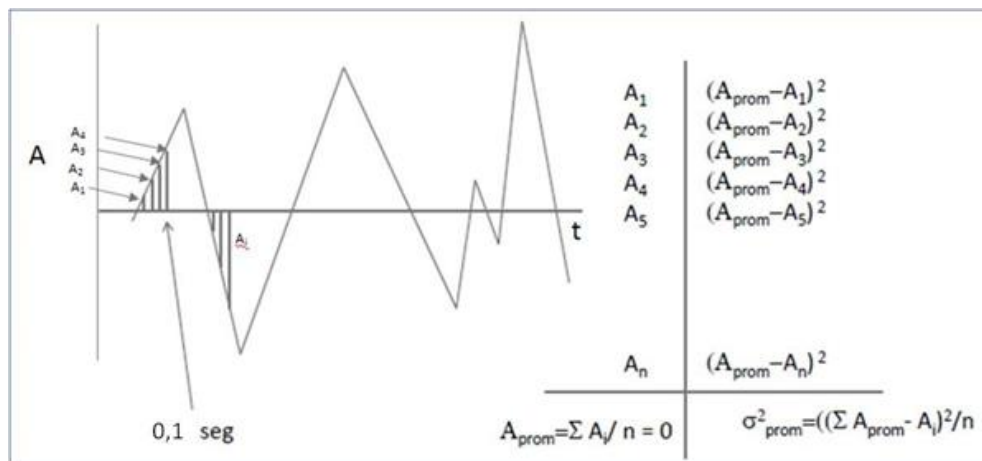


Figura 9 Proceso de digitalización de un registro de aceleraciones sísmicas para un intervalo de tiempo de $\Delta t = 0,1$ s (Echezuria, 2017)

El error medio cuadrático de la aceleración a_{rms} , ha sido usada por varios autores tales como Vanmarcke-Lai (1980) (VL); Trifunac-Brady (1975) (TB) y McCaan-Shah (1980) (McS) para definir el sector fuerte de un acelerograma sísmico. Dos de estas definiciones (VL y TB) usan la intensidad de Arias (1970), la cual es una medida de la energía de todo el registro sísmico y no del sector fuerte del mismo. Es decir, la intensidad de Arias utiliza toda la duración del acelerograma.

La definición de McS utiliza la variación del error medio cuadrático detectando el momento cuando dicho error acumulado comienza a declinar a medida que progresa el tiempo. En tal sentido, esta definición no está relacionada directamente con la energía del sismo como las dos anteriores, aunque sí indirectamente. Existe otra definición de la duración del sector fuerte del acelerograma dada por Bolt (1973), la cual utiliza un umbral de aceleración escogido por otros criterios. Esta última definición de duración tampoco está relacionada ni con el error medio cuadrático ni con la energía del acelerograma.

Existen distintos métodos que vinculan la determinación del sector fuerte del acelerograma bajo distintos criterios, en este estudio la del Profesor Heriberto Echezuria fue la escogida, gracias a relaciones que nos permiten determinar con más eficiencia el sector fuerte entre otros aspectos, este método será explicado mas adelante.

Echezuría (2015) estudió las variaciones de la duración en segundos T_{sm} el error medio cuadrático a_{rms} y la intensidad del sector fuerte del terremoto $I_{sm} = a_{rms}^2 T_{sm}$, para 83 acelerogramas de 18 terremotos con magnitudes de momento entre 5 y 7,7. En ese estudio se encontró que aunque las duraciones en segundos, T_{sm} y los errores medios cuadráticos de la aceleración, a_{rms} son diferentes para las cuatro definiciones de duración, las intensidades del sector fuerte del terremoto, I_{sm} obtenidas para esas definiciones de duración resultan prácticamente iguales, para fines prácticos. Esto se ilustra en la Figura 10, al comparar los a_{rms} , las T_{sm} y las I_{sm} obtenidas con las definiciones de TB y B para los sismos contenidos en la base de datos.

Lo anterior es un hallazgo muy interesante considerando que las cuatro definiciones de duración utilizan criterios conceptuales diferentes, aunque como se

mencionó antes, solamente tres de ellas utilizan el error medio cuadrático. Sin embargo es oportuno destacar que todas las duraciones involucran la aceleración pico del registro y diferentes sectores del acelerograma antes y después del tiempo en que ocurre dicha aceleración máxima o pico (Echezuria, 2017).

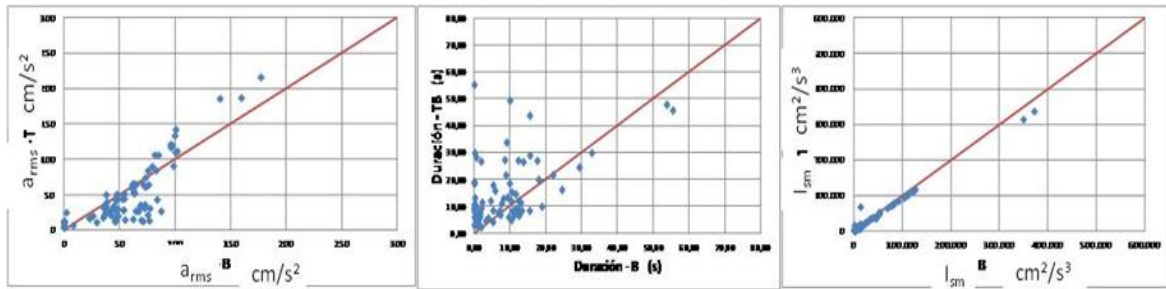


Figura 10 Comparación de los a_{rms} , T_{sm} e I_{sm} obtenidos con las definiciones de duración TB y B

Tanto el registro de acelerogramas como su tratamiento han ido cambiando a medida que han evolucionado los sistemas de adquisición y el almacenamiento y procesado de los datos.

El conocimiento de las fuerzas que actúan sobre un emplazamiento, debida a los terremotos, el análisis de sus efectos sobre las estructuras, el desarrollo de normas de construcción y los métodos para determinar el riesgo sísmico sobre las construcciones son algunas de las principales motivaciones para el estudio de acelerogramas.

En ellos, el parámetro de mayor interés es la aceleración del suelo, aunque también son importantes, la velocidad y el desplazamiento. Así si suponemos una estructura simple con una masa concentrada en su tejado (Figura 11) y consideramos la fuerza lateral concentrada en los elementos verticales, que serían las paredes o columnas (Universidad de Alicante, 2014).

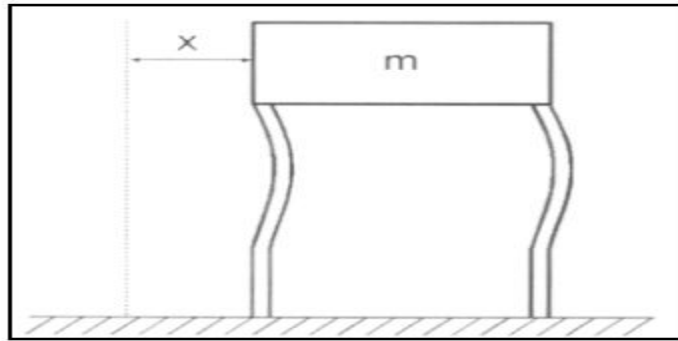


Figura 11 Estructura sometida a una fuerza lateral. (Universidad de Alicante, 2014)

Un método más preciso para estimar la energía disipada sometido a un acelerograma es el método de arias, el cual vincula mediante integrales absolutamente todo el sector fuerte, igualmente se presentan el estudio de los otros distintos métodos para así realizar las comparaciones respectivas.

2.3.1 Método de Arias

El método propuesto por Arias permite estimar la energía disipada por un sistema de un grado de libertad sometido a un acelerograma la cual está dada por:

$$I_a = \int_0^{\infty} E(\omega) d\omega$$

Donde, (I_a), es la intensidad de Arias, y, (E_{ω}) es la energía disipada por el oscilador de un grado de libertad impulsado a la frecuencia, ω . Es posible demostrar que utilizando el concepto de densidad de potencia espectral la expresión anterior se transforma en:

$$I_o = a_{rms}^2 Td$$

Donde, I_o es la intensidad del movimiento, a_{rms} es el error medio cuadrático del acelerograma, y Td es la duración total del registro o acelerograma en segundos. La expresión de arriba indica que el cuadrado del error de las aceleraciones puede ser tomado como una intensidad constante actuando durante el tiempo total del movimiento, Td.

Trifunac y Brady definieron el inicio del sector fuerte del acelerograma como aquel donde se alcanza el 5% de la intensidad del movimiento I_o , mientras que el fin del sector fuerte se obtiene al alcanzar el 95% de I_o . La justificación para esto se basa en que

la mayoría de los terremotos tienen pequeñas amplitudes al inicio y al final del movimiento.

Vanmarcke y Lai definieron el sector fuerte basados en que la intensidad de Arias está uniformemente distribuida en el intervalo fuerte del movimiento, T_{sm} con un poder promedio dado por a_{rms}^2 . Adicionalmente, esos autores asumieron que la función densidad de las aceleraciones de un sismo puede ser considerada como un proceso Gausiano y definieron la relación entre la aceleración pico PGA y el error medio cuadrático a_{rms} como $Q=PGA/a_{rms}$. Además, esos autores asumieron arbitrariamente la probabilidad de exceder al menos una vez la razón, Q , durante el intervalo de tiempo T_{sm} como $1-e^{-1}$. Para estas condiciones la solución para T_{sm} se obtiene en términos de I_a , T_{sm} , PGA y To , de acuerdo con las expresiones siguientes:

$$T_{sm} = Q^2(I_a/PGA^2) = [2\ln(2Td/To)][I_a/PGA^2] \quad \text{para } T_{sm} \geq 1.36 To$$

y

$$T_{sm} = Q^2(I_a/PGA^2) = 2I_a/PGA^2 \quad \text{para } T_{sm} < 1.36 To$$

Donde, T_{sm} es la duración del sector fuerte del terremoto y To , es el período promedio del acelerograma.

Ahora bien, considerando que la selección de la probabilidad de exceder la razón Q durante la duración, T_{sm} es arbitraria y que esos autores encontraron que la razón I_a/PGA^2 es prácticamente lineal, VL propusieron una versión simplificada de la solución utilizando un valor constante para la razón $Q=2,74$. Esta solución simplificada fue utilizada en este estudio.

McCaan y Shah definieron el sector fuerte del terremoto como el intervalo que exhibe un valor constante del a_{rms} . El inicio del sector fuerte se obtiene generando la función acumulada del a_{rms} del acelerograma invertido sobre la cual se selecciona el momento al cual el a_{rms} comienza decaer. Este tiempo define el inicio del sector fuerte y es denominado T_1 . El final del sector fuerte se obtiene aplicando el mismo método al acelerograma original comenzando en T_1 .

Bolt utilizó el concepto de aceleración umbral para definir el sector fuerte del acelerograma. Una vez que se ha establecido dicho valor umbral de aceleración el sector fuerte queda establecido por la porción del acelerograma obtenido entre la primera y la última vez que el umbral es excedido en el registro de aceleraciones. Para este estudio se utilizó un valor umbral de aceleración $a_u = 0,05g$ siendo, g , la aceleración de la gravedad.

Nótese que la intensidad del sector fuerte del acelerograma $I_{sm} = a_{rms}^2 T_{sm}$, está definida de manera análoga a la intensidad obtenida con el criterio de Arias, I_o sólo que tomando en cuenta la duración del sector fuerte del acelerograma y el valor correspondiente del error medio cuadrático de la aceleración en dicha duración. Eso equivale a tener una amplitud constante o potencia aplicada durante la duración establecida para dicho sector fuerte.

La aplicación por Echezuría (1983) de los criterios descritos antes en esta sección para las cuatro definiciones de duración permitió determinar las T_{sm} los a_{rms} y las I_{sm} para cada uno de los registros de los sismos incluidos en la base de datos. Es oportuno destacar que la aceleración máxima queda incluida y marca un punto casi simétrico dentro de los sectores fuertes de los acelerogramas cuando se aplican a los terremotos reales para todas las definiciones de duración utilizadas.

La base de datos empleada para el estudio consta de 83 acelerogramas de 18 terremotos con magnitudes de momento (M_w) entre 5 y 7,7 y es la misma empleada por Echezuría (1983) para desarrollar una relación de atenuación para el error medio cuadrático de la aceleración a_{rms} aplicable a la ciudad de San Francisco, California y por Kavazanjian y otros (1984) para estimar la amenaza de licuación debida a terremotos en esa misma ciudad. Esta base de datos incluye sismos grabados en el campo cercano, es decir, menos de 10 km de la fuente (Echezuría, 2017).

A continuación se mostraran los resultados obtenidos por estos estudios y las comparaciones de cada una de las características que nos definen los sismos por los distintos métodos ya explicados.

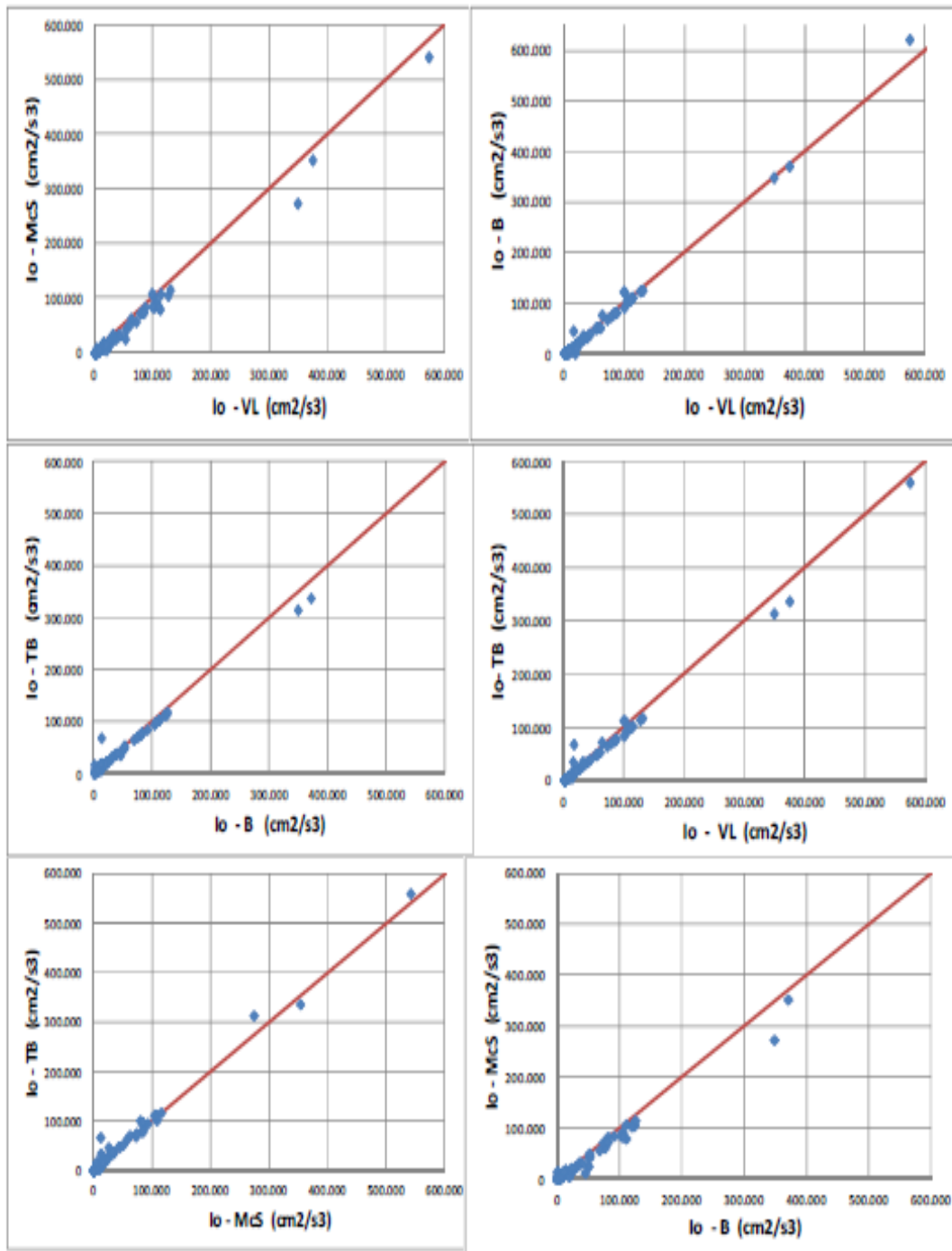


Figura 12 Intensidad de Arias Intensity para el sector fuerte de 83 registros de 18 sismos con M_m entre 5 y 7,7 obtenidas con las cuatro definiciones de duración.(Echezuria, 2017)

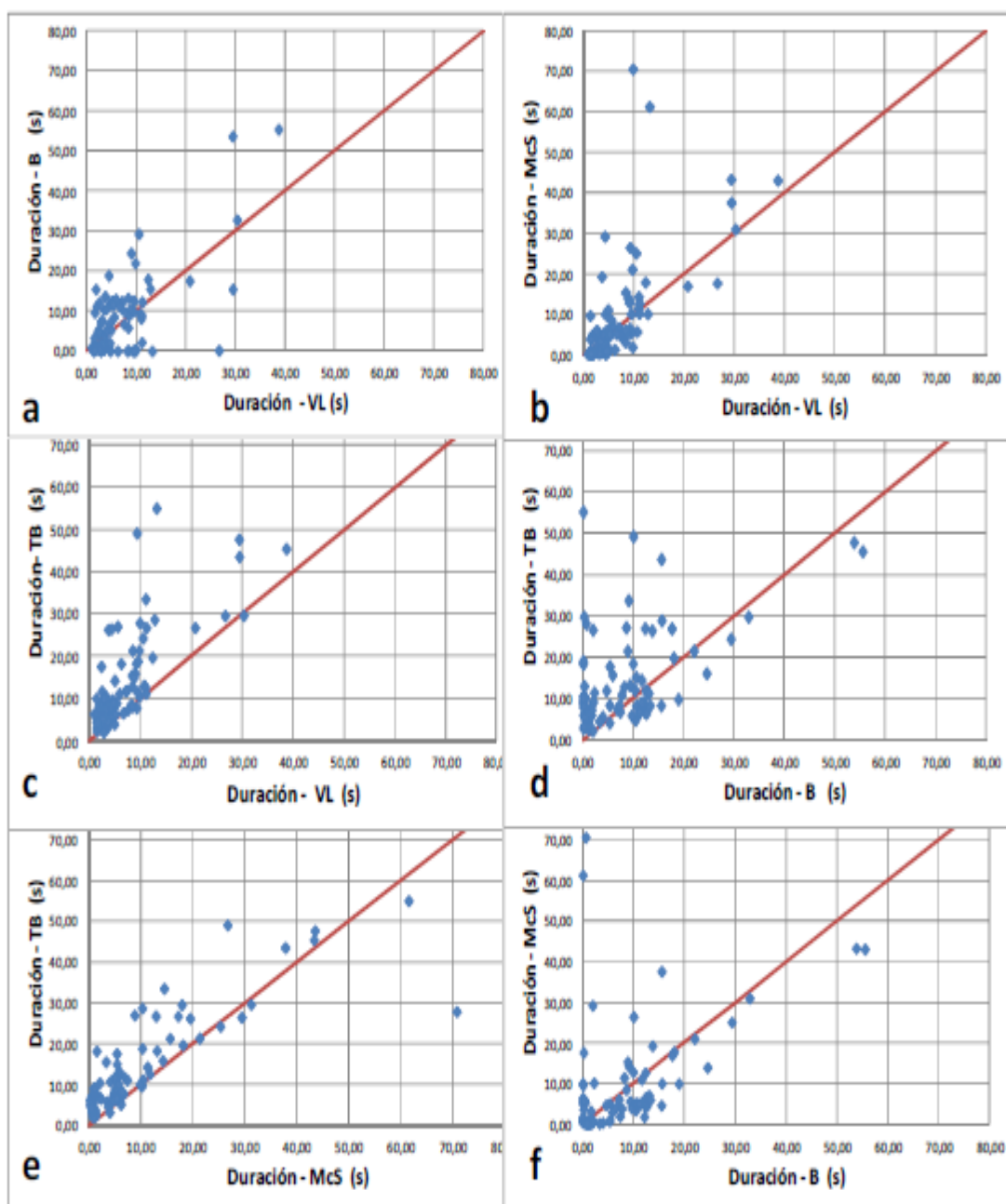


Figura 13 Comparaciones de las duraciones en segundos obtenidas con las cuatro definiciones de duración, para 83 registros de 18 sismos con M_m entre 5 y 7,7. (Echezuria, 2017)

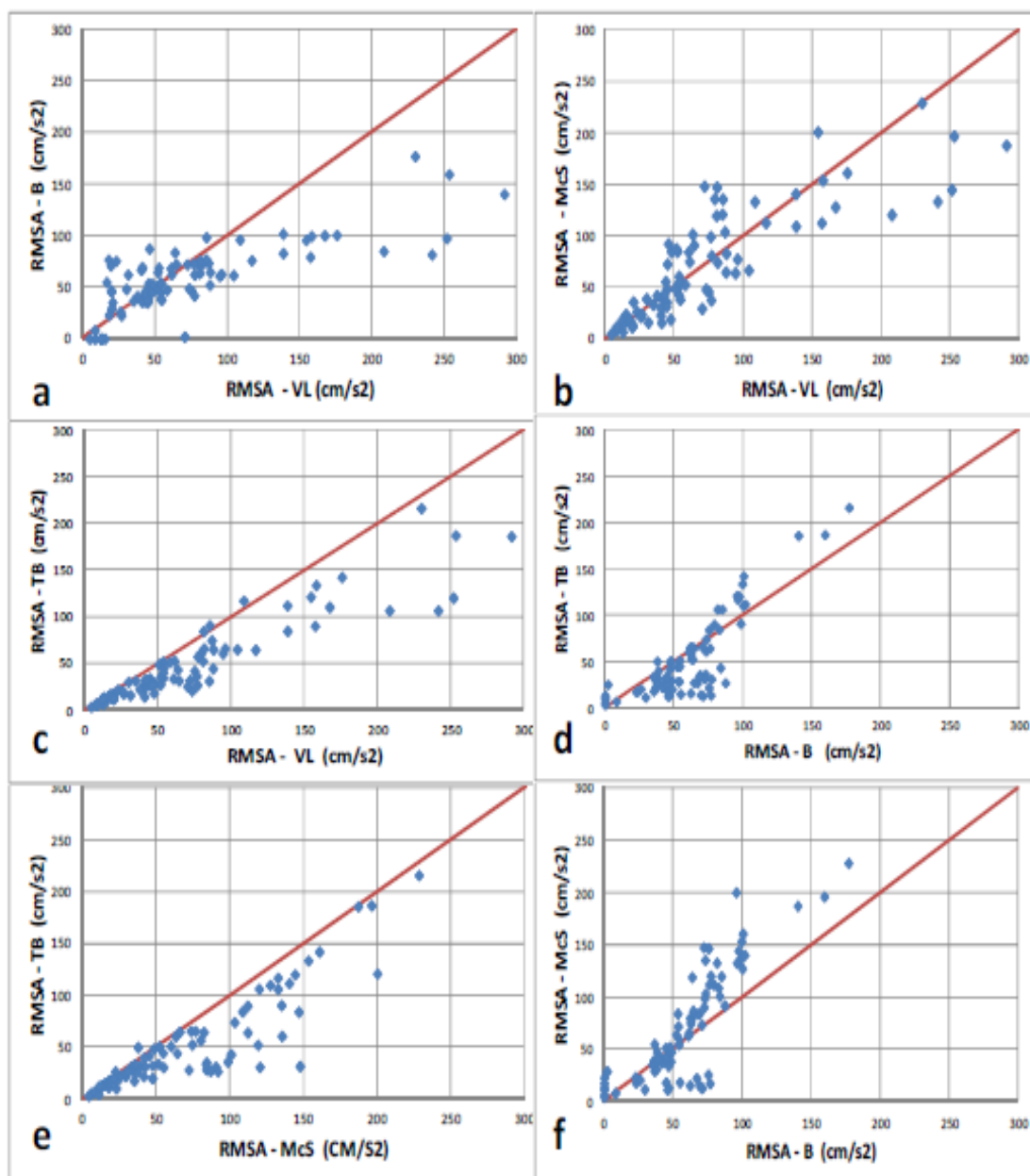


Figura 14 Comparaciones de los errores medios cuadráticos de aceleración RMSA obtenidas con las cuatro definiciones de duración, para 83 registros de 18 sismos con M_m entre 5 y 7,7. (Echezuria, 2017)

Gracias a los estudios realizados por el Ingeniero Heriberto se obtuvieron grandes hallazgos y grandes conclusión en base a la selección del sector fuerte del sismo, asimismo podemos decir que:

- La intensidad de los sismos se atenúa con la distancia y la Magnitud.
- Asimismo, la intensidad depende de las condiciones locales, es decir, si se está en un afloramiento rocoso o sobre suelos blandos/sueltos o duros/densos.
- Adicionalmente, el espesor del depósito afecta la intensidad, estos últimos aspectos definen los denominados efectos de sitio.

2.3.2 Análisis del a_{rms} y T_{sm} de funciones periódicas individuales y obtenidas con los criterios de Fourier

Echezuría (1997) realizó una serie de análisis para estudiar a fondo las diferencias entre las distintas duraciones con relación a la potencia del sismo tomada como el cuadrado de las aceleraciones y la duración en segundos del sector fuerte del acelerograma. El razonamiento utilizado por Echezuría es que sabemos que una serie de Fourier es una serie infinita que converge puntualmente a una función periódica y continua a trozos. Las series de Fourier constituyen la herramienta matemática básica del análisis de Fourier empleado para analizar funciones periódicas como las series presentadas en las intensidades que presentan los sismos en estudio, a través de la descomposición de dicha función en una suma infinita de funciones sinusoidales mucho más simples.

Ahora bien, para cumplir con el hecho de que la aceleración máxima quedara centrada en el sector fuerte del acelerograma, el procedimiento se aplicó de acuerdo con lo indicado en la Figura. 15. Es decir, se seleccionaba el valor máximo de la aceleración y a partir de allí se incluían progresivamente aceleraciones a ambos lados del mismo para calcular el a_{rms} cada vez que se incluían nuevos valores del tiempo al ampliar el rango de la duración. La digitalización se realizó en principio a cada $t = 0,1 s$, al igual que para el caso de los acelerogramas reales.

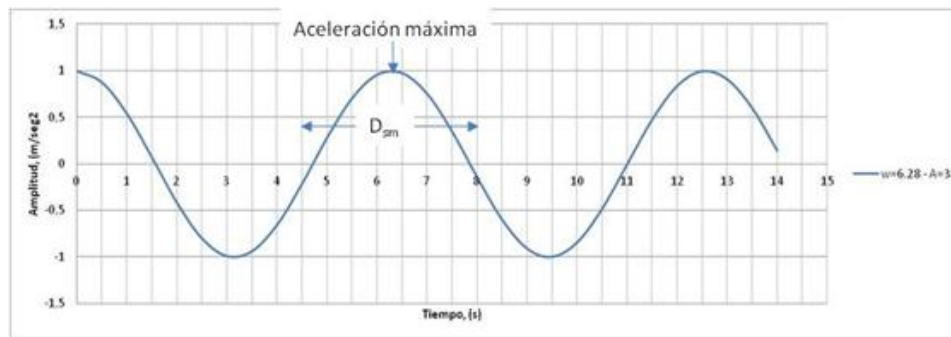


Figura 15 Función periódica de aceleración indicando la amplitud máxima y la duración del sector fuerte del acelerograma. (Echezuria, 2017)

Como se observa en la Figura. 15, partiendo del valor de la aceleración máxima y midiendo a cada lado de la misma la mitad de la duración, para valores pequeños de dicha duración los valores de las aceleraciones involucradas en el cálculo del error medio cuadrático son parecidas a la aceleración máxima, con lo cual el a_{rms} será muy pequeño. A medida que aumenta la duración, comienzan a incluirse aceleraciones más pequeñas con lo cual el a_{rms} comienza a aumentar hasta alcanzar un valor de la duración equivalente a algo más del medio ciclo, donde alcanza un máximo. Eso se debe a que al aumentar la duración se incluyen aceleraciones con amplitudes cada vez más alejadas de la amplitud máxima. En otras palabras, el a_{rms} aumenta cuando incorporamos valores pequeños de las aceleraciones ya que nos alejamos del valor de la aceleración máxima. Contrariamente, cuando se incorporan aceleraciones crecientes entonces el a_{rms} disminuye ya que nos aproximamos a los valores de la aceleración máxima. Este proceso es muy importante entenderlo e internalizarlo ya que ayudará en los análisis que se presentan más adelante en este artículo.

En este caso, se observa que tanto el a_{rms} como la varianza a_{rms}^2 alcanzan un máximo y luego decrecen pero I_{sm} siempre continúa creciendo aunque muestra un quiebre en su tasa de crecimiento. Se evidencia, también, en la Figura 17 que mientras estamos calculando el a_{rms} en las inmediaciones de la aceleración máxima los valores de dicha variable y de a_{rms}^2 aumentan hasta los 2,5 segundos aproximadamente y luego

disminuyen hasta aproximadamente los 10 segundos, para la función particular de la Figura 16. A partir de allí hay un pequeño aumento y luego vuelve el descenso de ambas curvas. Véase la Figura 17.

El quiebre drástico en el crecimiento de la curva de I_{sm} mostrado en la Figura 17 es un indicativo de que se ha cubierto el sector fuerte del sismo hasta esa duración, lo cual se puede constatar por inspección en la Figura 16.

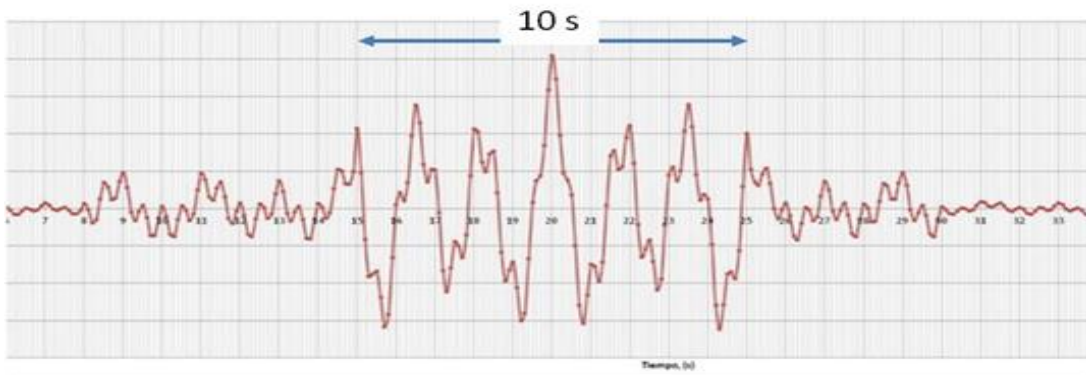


Figura 16 Función compleja con sector fuerte bien definido con transición gradual hacia el resto del acelerograma (Echezuria, 2017)

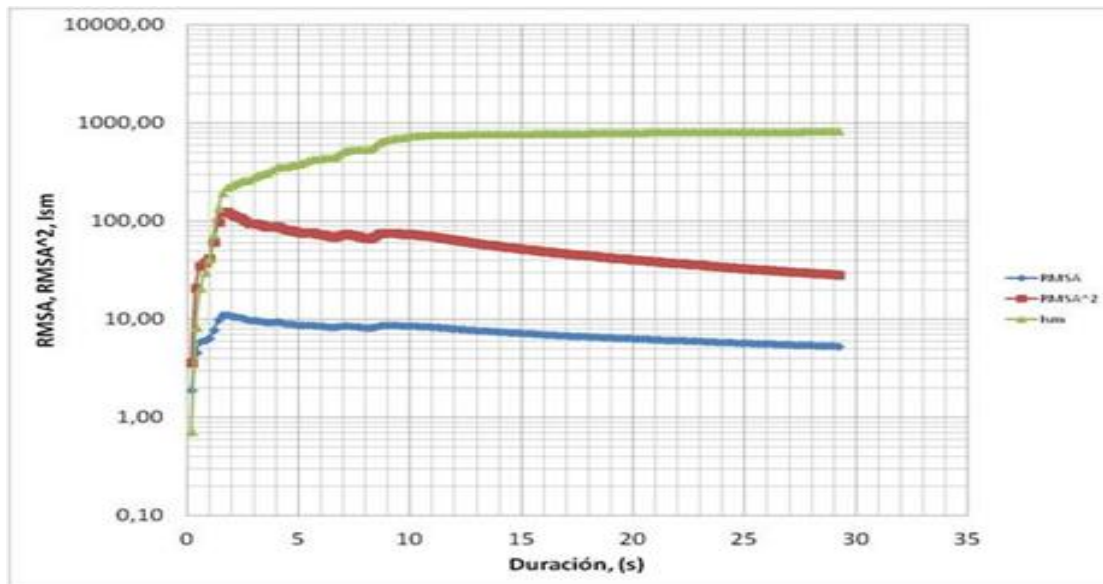


Figura 17 Valores de a_{rms} , a_{rms}^2 e I_{sm} de una función compleja sector fuerte bien definido y transición a la zona con aceleraciones bajas, muy similar a un acelerograma. (Echezuria, 2017)

Toda esta serie de estudios realizados para determinar el sector fuerte del sismo fueron establecidos bajos los parámetros del profesor Heriberto Echezuria, en comparación con las otras definiciones del sector fuerte, y es el escogido para el análisis en esta presentación, este método es el más acercado a la realidad y por ende nos permite el conocimiento de este sector contemplando los cambios drásticos que se presentan en los diagramas del error medio cuadrático, por lo tanto el más eficiente.

2.3.3 Potencial de licuación utilizando la intensidad del sector fuerte del sismo

Como se indicó anteriormente y según Echezuría (2015), la intensidad de movimiento fuerte disminuye con la magnitud y la distancia del momento. Esto se puede ver en la Figura 18 para los rangos de magnitud seleccionados usando la definición de TB de movimiento fuerte.

Este hecho permitirá estimar la función de demanda, para problemas tales como el potencial de licuación, en términos de las condiciones y características de la provincia sísmica en lugar de utilizar medios indirectos para definirla, como se hace actualmente. Esto también permitirá estimar dicho potencial de licuefacción en términos probabilísticos similares a los análisis de peligros para PGA y espectros de diseño. También significa que el potencial de licuefacción se puede evaluar con una probabilidad de ocurrencia para un lapso de vida dado considerando la contribución de todas las distancias y magnitudes de las fuentes al mismo tiempo.

Para lograr eso, será necesario estimar la intensidad de movimiento fuerte capaz de generar licuefacción considerando la energía requerida por las condiciones geotécnicas de un depósito de suelo dado. La práctica actual de ingeniería utiliza la relación de esfuerzo cíclico (CSR) o la relación de resistencia cíclica (CRR) (Seed et al (1975), fide Kramer [7]) para evaluar dicha intensidad, es decir, la demanda.

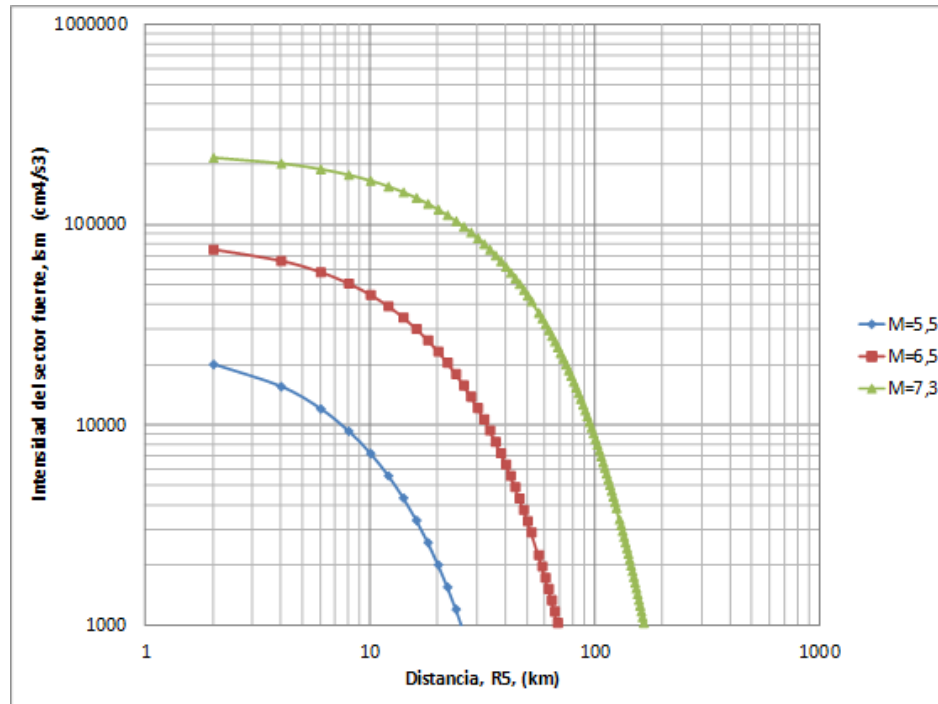


Figura 18 Variación de los valores de I_{sm} de la definición de TB de duración de movimiento fuerte con magnitud y la distancia más cercana a la proyección superficial de la falla para los registros de aceleración. (Echezuria, 2017)

Vale la pena mencionar que el uso de esos parámetros (CSR y CRR) es una forma indirecta de estimar tal demanda que solo toma en cuenta la magnitud cuando se evalúa la energía requerida para licuar una muestra de arena con varios ciclos de amplitud de esfuerzo equivalente. La amplitud de la tensión se calcula utilizando 65% de la PGA que, como se ha visto hasta ahora, no tiene conexión con el cuadrado medio de aceleración, o con la duración en segundos o con la potencia de grabación o con la intensidad de movimiento fuerte. Mientras tanto, como se demostró anteriormente, la energía expresada en términos de intensidad de movimiento fuerte varía no solo con la magnitud sino también con la distancia. Por lo tanto, este 65% utilizado para estimar la amplitud equivalente promedio para el PGA también variará con la magnitud y la distancia.

Si se toman los valores del PGA a las distancias a las que se ha observado la licuefacción y se estima su aumento utilizando el método de Idriss que se muestra en la Figura 19, Se puede inferir el umbral para la licuefacción que induce la intensidad.

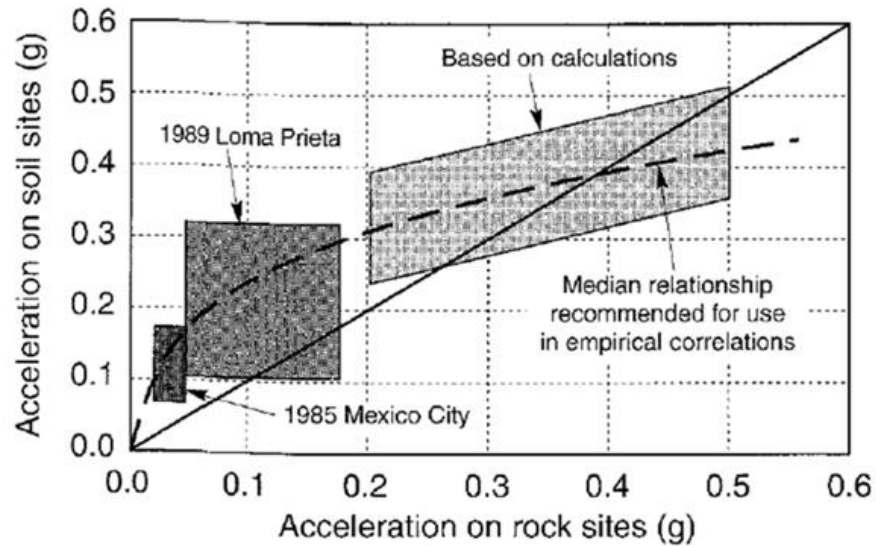


Figura 19 Valores estimados de I_{sm} para inducir licuefacción. (Kramer, 1996)

Finalmente podemos establecer la variación de los valores de I_{sm} en comparación a la base de datos de aceleración incluidos y establecer los límites y el factor representativo de la intensidad para distintos tipos de magnitud.

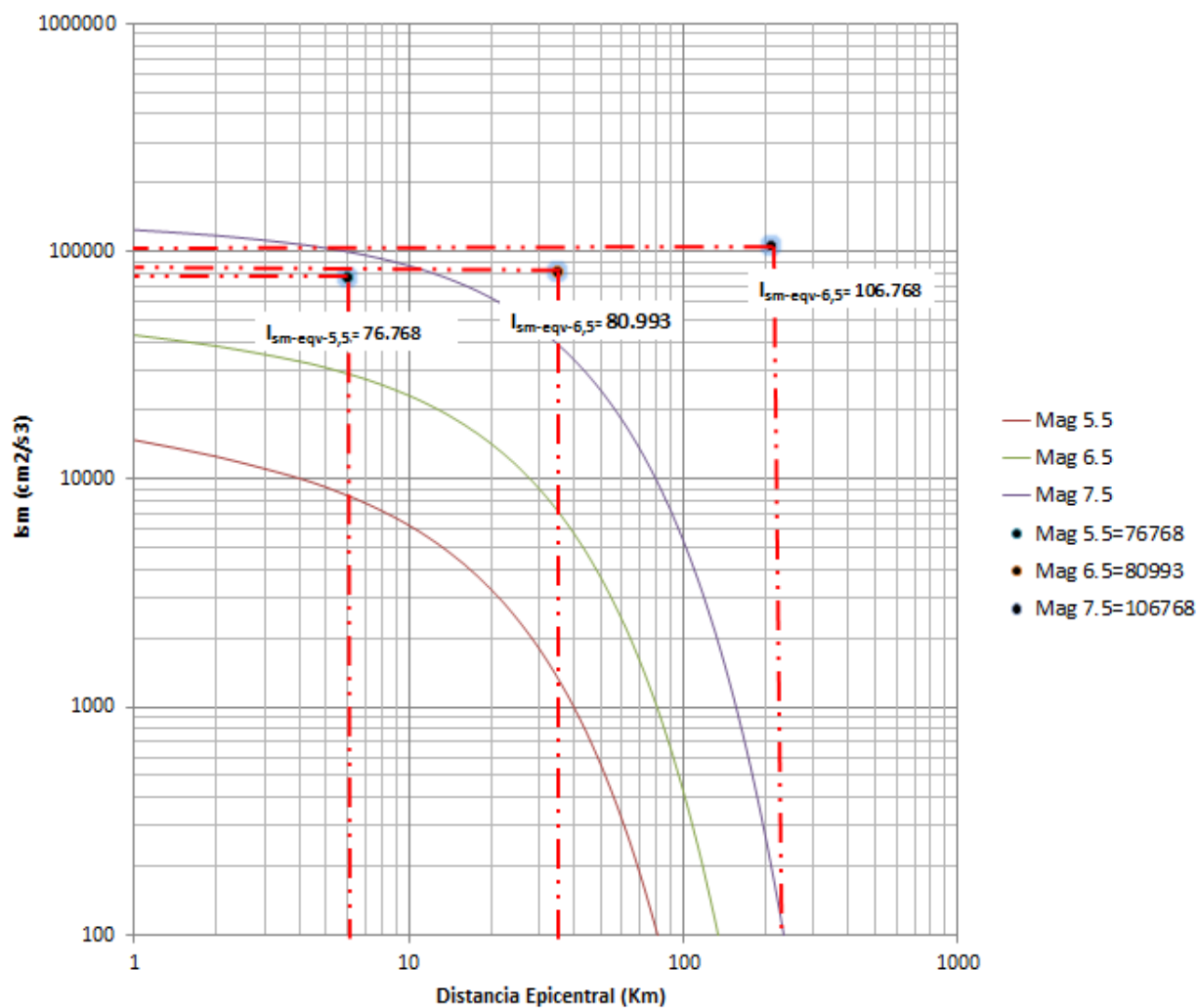


Figura 20 Variación de I_{sm} con magnitud y distancia epicentral, incluidos los valores de umbral estimados obtenidos de pruebas de laboratorio y respuesta de suelo blando utilizando los valores de amplificación recomendados por Idriss. (Echezuria, 2017)

Capítulo 3

Marco Metodológico

Este TEG está basado en el análisis de la intensidad del sector fuerte del sismo, por ende es necesario una recopilación de información sobre sismos ocurridos, el cual fueron obtenidos por la base de datos de Peer Ground Motion Data Base, cabe destacar que los sismos escogidos fueron tomados en roca, para luego por medio del programa Deep Soil pasar el sismo a través de perfiles, obteniendo así los acelerogramas en superficie y luego analizar si poseen la energía necesaria para que ocurra licuación.

3.1 Los Acelerogramas en Roca

Los acelerogramas fueron obtenidos por la extensa base datos de la PEER GROUND MOTION DATA BASE, en la sección de NGA-WEST2. Estos sismos fueron seleccionados por su distancia epicentral y las magnitudes están dentro de 5 y 8 dando un total de 107 sismo escogidos (Apéndice 1,2 y 3). Esta data nos proporcionaba registros en las 2 direcciones, y se tomaron en cuenta para ver la variación en ambos sentidos.

3.2 Intensidad del sector fuerte

Las intensidades del sector viene dada por el producto del $ar_{sm}^2 * T_{sm}$ en donde ar_{sm} es el error medio cuadrático del acelerograma y T_{sm} el tiempo del sector fuerte. Esta intensidad fue calculada por 3 métodos diferentes tales como: Bolt, MCann y Echezuria el cual cada método define un sector fuerte.

3.3 Ley de Atenuación

Para la ley de atenuación se calcularon las intensidades del sector fuerte de ambos acelerogramas horizontales en roca de los sismos incluidos en la base de datos con distancia, magnitud y tipo de fuente. Luego, se seleccionaron aquellos con las mayores intensidades para evaluar la ley de atenuación. La Figura. 21 muestra en diferentes colores las intensidades por magnitud y distancia epicentral. Se buscó una ecuación que modelara conceptualmente los aspectos físicos de la intensidad, es decir, que la misma aumenta con la magnitud y se atenúa con la distancia. Se probaron varios modelos típicamente utilizados para la aceleración máxima del terreno y se adaptaron a los datos mediante una regresión múltiple no lineal. Para ello se utilizó un programa llamado XLSTAT el cual actúa como complemento de Excel. Dicho programa al proporcionarle las constantes, las variables y la fórmula deseada, calcula los valores de las constantes, el error medio y la bondad del ajuste (R^2). Es bueno destacar que el programa utilizado para la regresión es limitado en los métodos de convergencia y no ajusta debidamente los modelos con los datos. Esto se comprobó para algunos modelos utilizados para la aceleración máxima del terreno y el error medio cuadrático de la misma que funcionaron para otras regresiones realizadas por el tutor con otros métodos de ajuste. No obstante, se tomó la fórmula con el mejor R^2 ya que la misma es la que permite un mejor ajuste de los datos con el modelo (fórmula empleada). Esto se describe en la próxima sección de este TEG. Una vez obtenida la mejor regresión se hizo el gráfico para magnitudes entre 5 y 8 con su respectiva desviación.

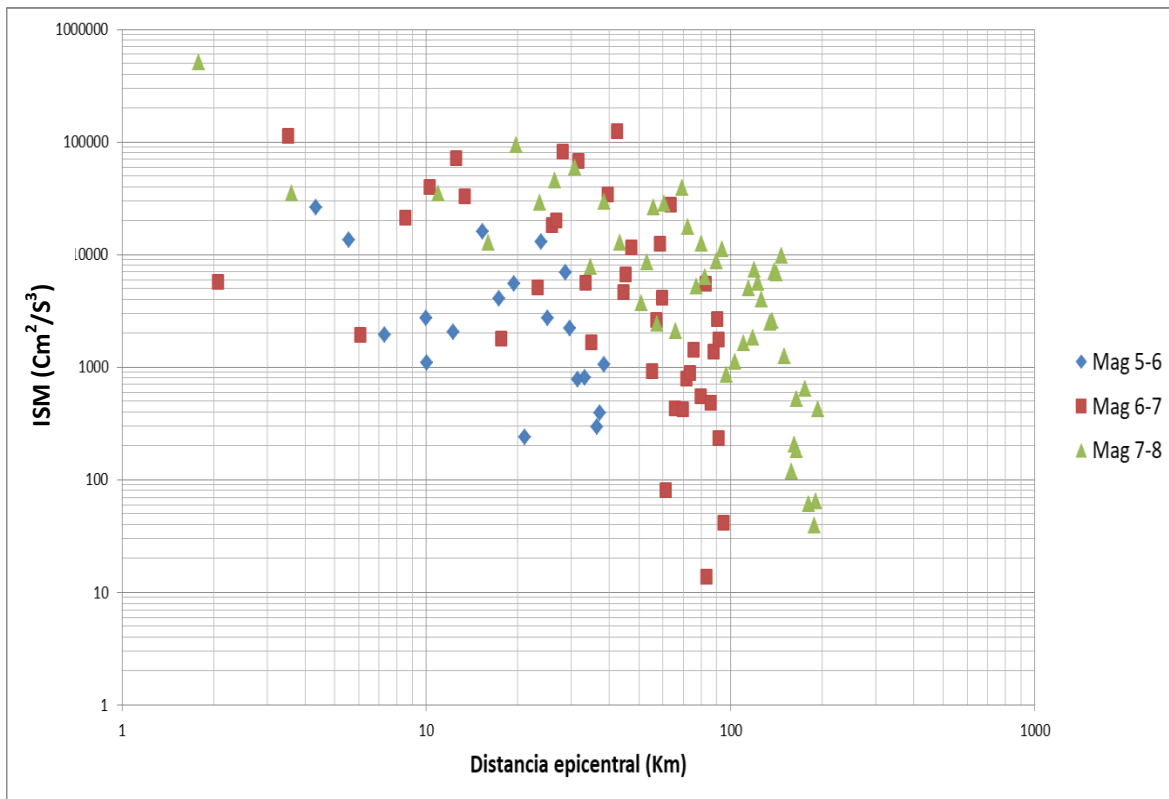
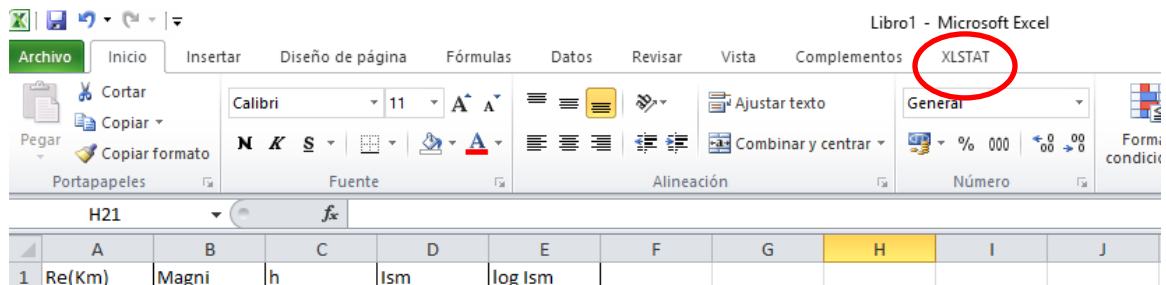


Figura 21 Datos para la Ley de Atenuación

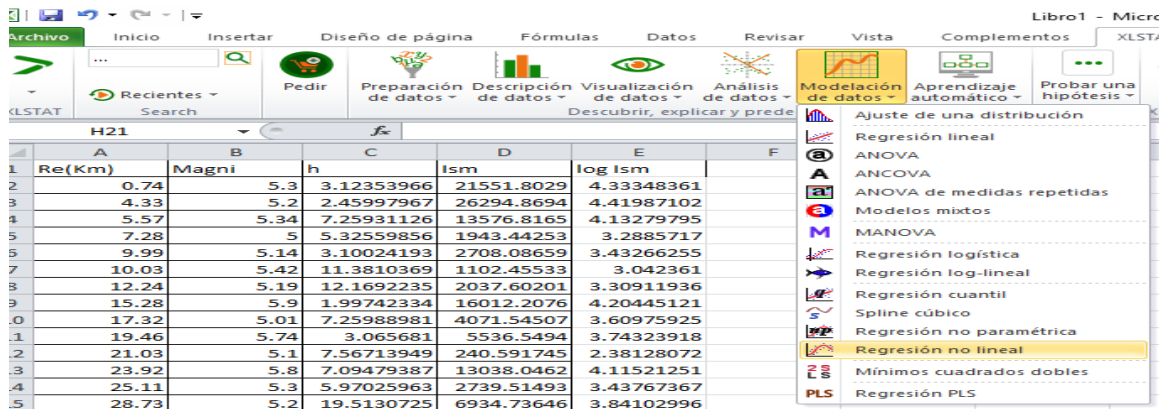
3.3.1 Regresion Multiple No Lineal

La regresión múltiple no lineal se obtuvo por medio de XLSTAT, este se usó de la siguiente forma:

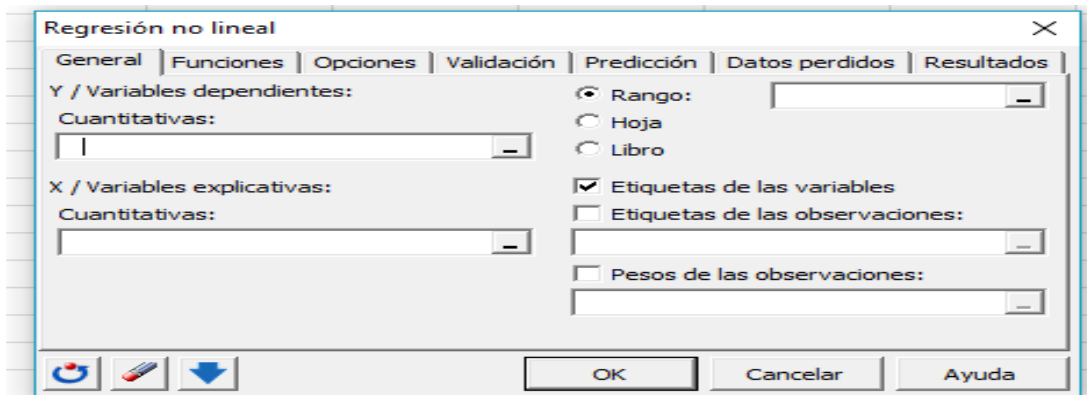
1) Instalar el complemento en Excel



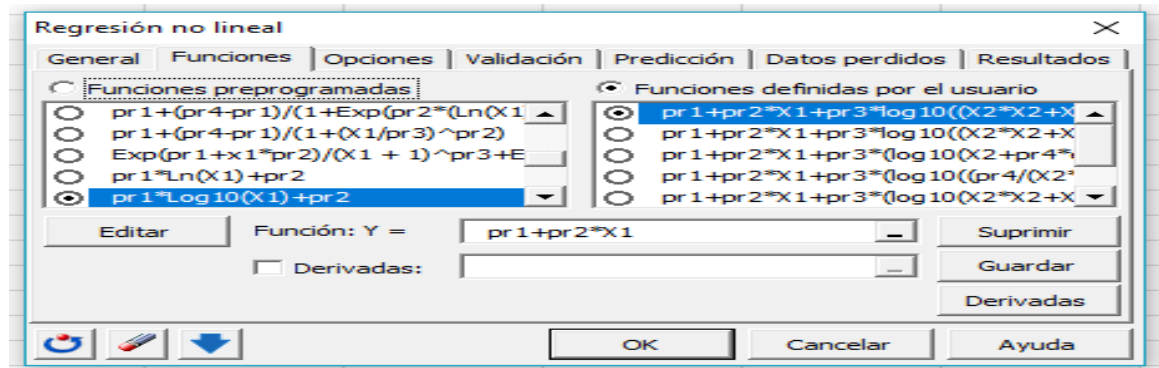
2) al darle click a XLSTAT, Seleccionar Modelación de datos y regresión no lineal



3) En la pestaña General, se selecciona las variables dependientes, en nuestro caso el valor de lsm y como variables explicativas los valores de magnitud y distancia; En rango elegimos en donde queremos los resultados:



4) En la pestaña de funciones, le damos a “funciones definidas por el usuario”, añadir y seleccionamos la casilla donde tenemos la fórmula y luego darle guardar:



Nota: El lenguaje del programa consiste en que los valores que queremos calcular son denominados por $pr1, pr2, prN$ y los valores que ya son datos se toman como $X1, X2, XN$.

Al darle OK, realizara los cálculos y obtendremos los valores de la ecuación que se adapten mejor a la curva.

3.4 Acelerogramas en Superficie

Para evaluar las intensidades del sector fuerte de los acelerogramas en superficie se tomaron un total de 13 sismos. Los mismos fueron seleccionados de manera que estuvieran en la zona límite del gráfico de observación de licuación con magnitud y distancia epicentral, el cual se muestra en la Figura 22. La intención es evaluar cómo cambia la intensidad del sector fuerte de sismos a las distancias límites de cada magnitud al pasar de roca a la superficie del terreno. La Figura 23 muestra la ubicación de los sismos seleccionados, los cuales caen dentro de la zona licuable.

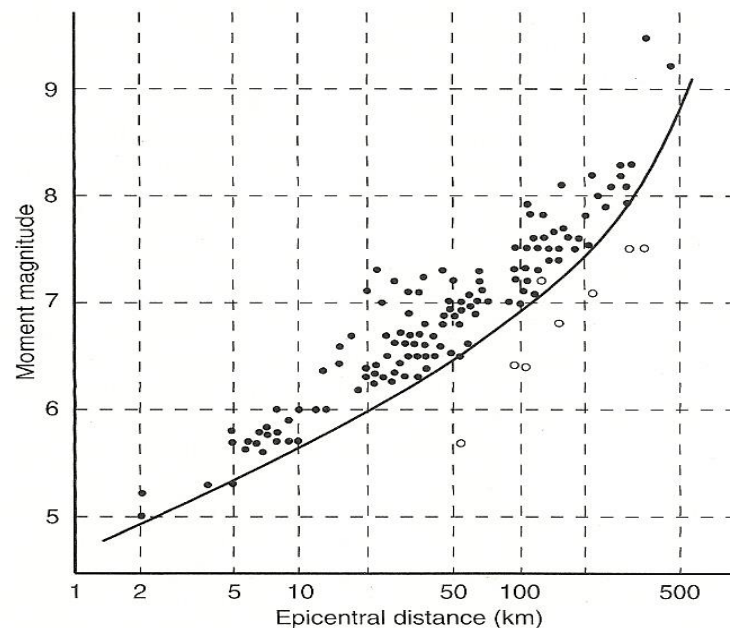


Figura 22 Relación entre la distancia epicentral en la cual ocurre licuación con respecto a la magnitud de momento. (Kramer, 1996)

Dist. Epi (Km)	Magnitud
0.74	5.30
15.28	5.90
4.33	5.20
12.56	6.06
25.88	6.54
79.59	6.88
93.70	7.00
135.00	7.62
42.30	6.61
5.57	5.34
55.82	7.30
69.21	7.28
89.76	7.35

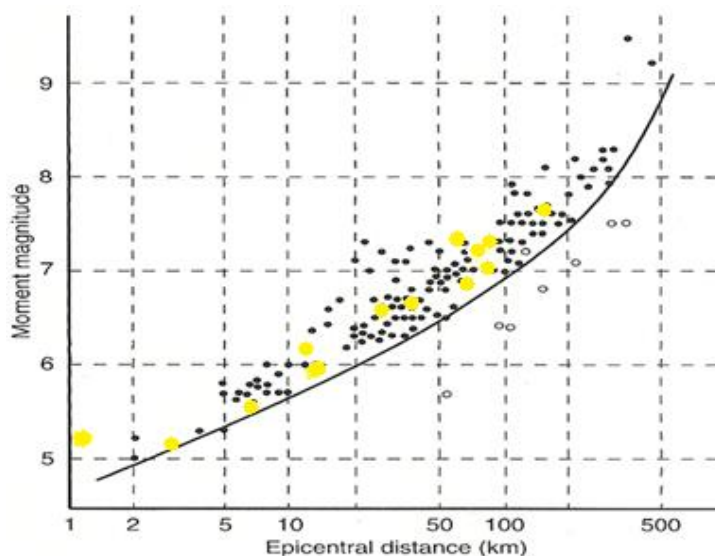


Figura 23 Sismos Escogidos

3.4.1 Programa DeepSoil

La respuesta dinámica del perfil geotécnico para obtener los acelerogramas en superficie fue realizada con el programa DEEPSOIL. Este programa permite escoger en cual estrato del perfil se desea obtener los acelerogramas. Dependiendo de la elección del usuario del Método de análisis, pueden estar disponibles diferentes opciones de Tipo de solución, Modelo de suelo por defecto, Formulación de retransmisión / descarga predeterminada (Véase la figura 24)

Analysis Method		Soil Model	Hysteretic Re/Un-loading Formulation	Pore Pressure Options
Linear	<u>Frequency</u> and <u>Time</u> domain	-	-	-
Equivalent Linear	<u>Frequency</u> domain	• General Quadratic/Hyperbolic Model (GQ/H)	• Non-Masing • Masing	-
Nonlinear	<u>Time</u> domain	• Pressure-Dependent Modified Kondner Zelasko (MKZ) • Yee et al. (2013) • Discrete Points (Equivalent Linear) • User-Defined (UMAT)		• Generate Excess Porewater Pressure • Enable Dissipation • Make top of Profile Permeable • Make Bottom of Profile Perm.

Figura 24 Tipos de estudios realizados en DeepSoil

Una vez seleccionado el método, se procede a pasar los datos del perfil a estudiar (Véase la figura 25). Una vez colocado todo el perfil, el programa calcula automáticamente el periodo fundamental dado por $4H/V_s$, y también se puede observar el cambio de la velocidad de corte en todo el perfil. (Véase la figura 26)

Soil Profile Definition

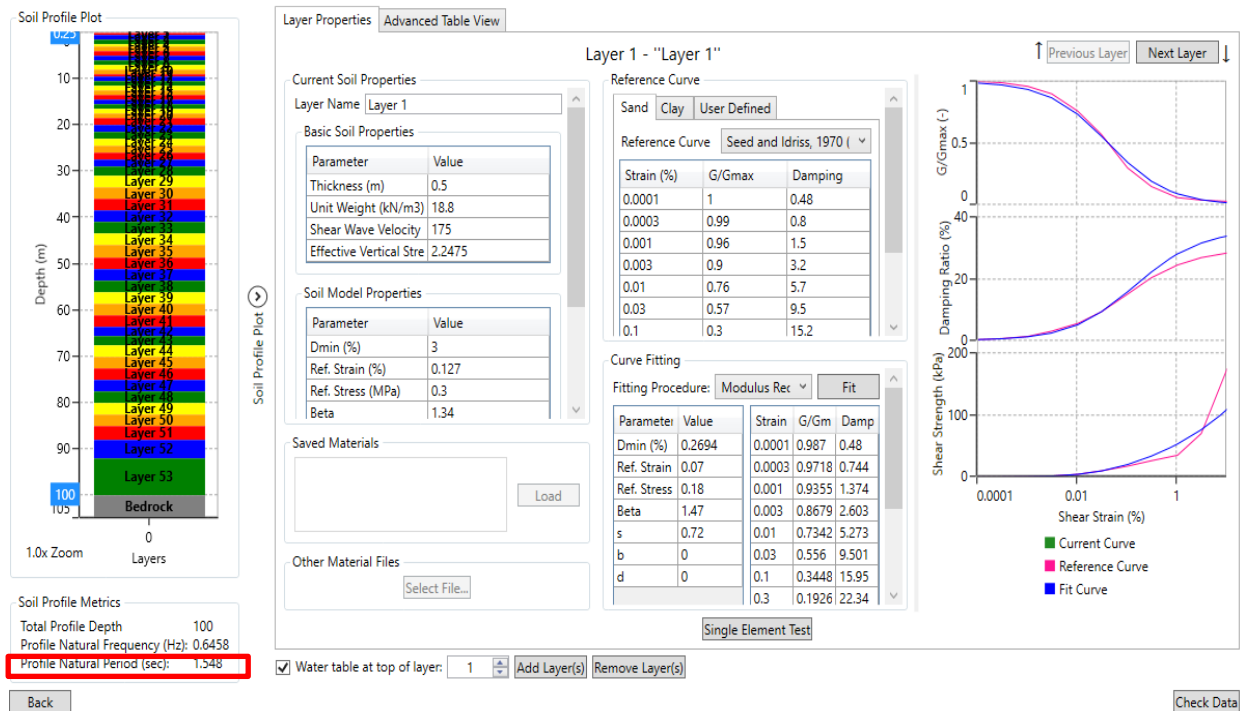


Figura 25 Datos del perfil

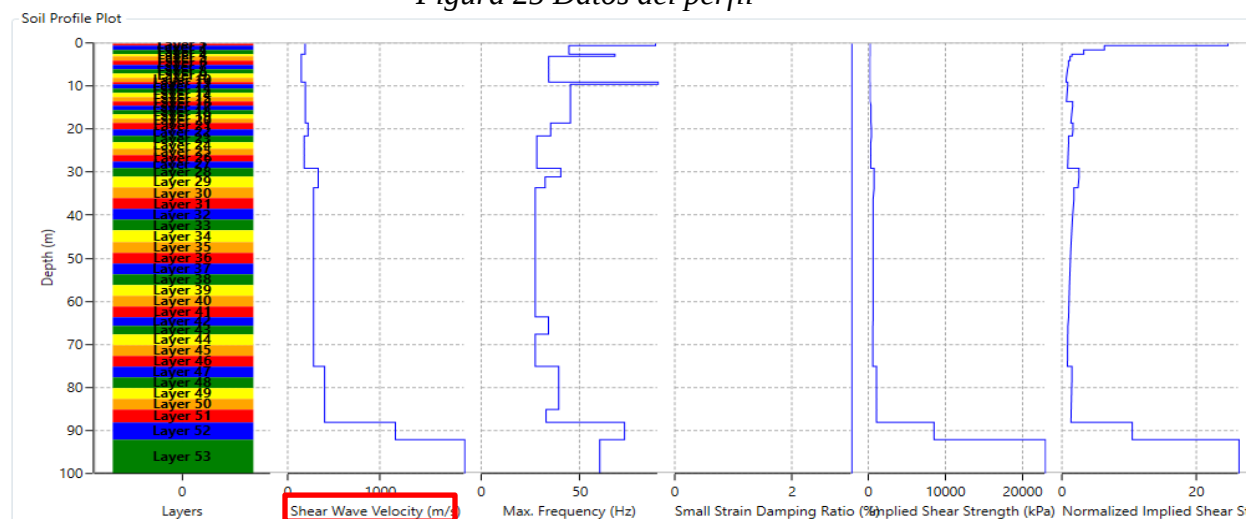


Figura 26 Detalles del perfil

Luego se procede a colocar el sismo que deseas, si quieres agregar un sismo, toma la opción de agregar nuevo sismo y debe ingresarlo el sismo en formato .txt y colocar el tiempo en que esta evaluado. Luego le das convertir y ya tienes el sismo cargado, después seleccionas el sismo y continuar. (Véase las figura 27,28)

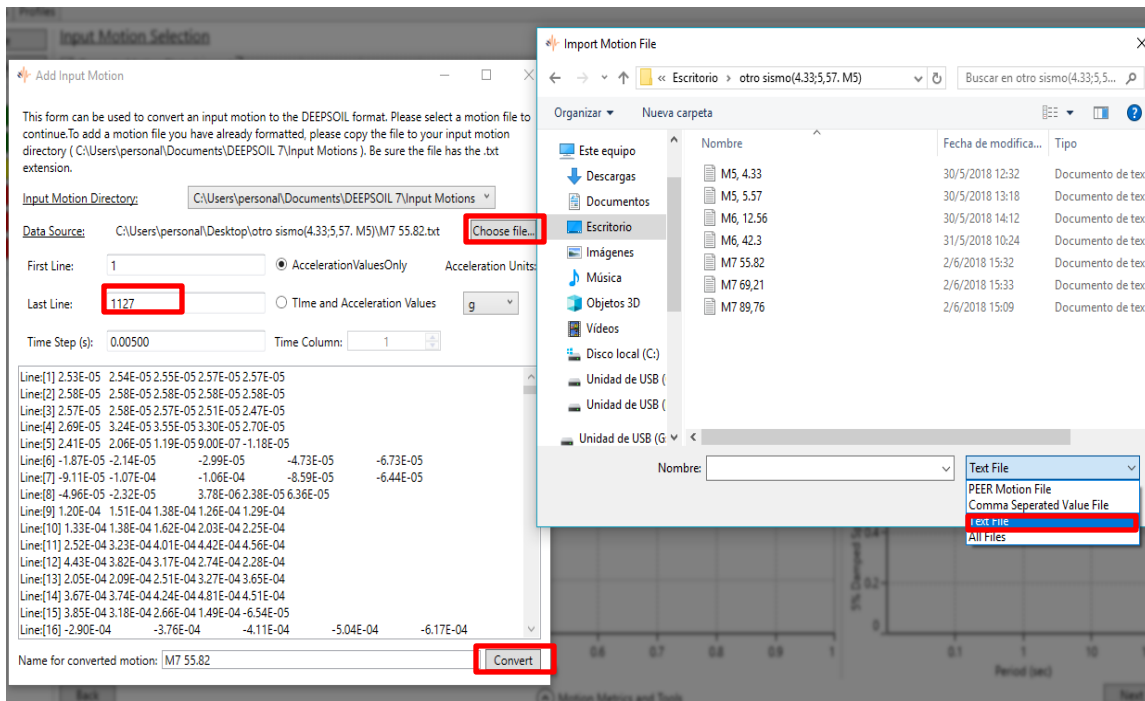


Figura 27. Selección del sismo en formato .txt

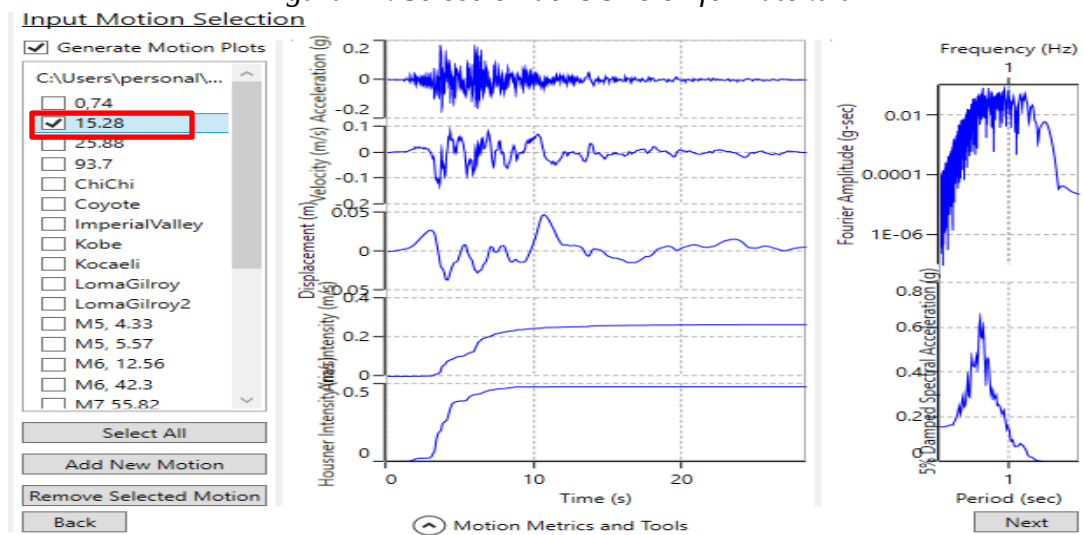


Figura 28 Sismo cargado correctamente

Luego se entra a la definición de amortiguamiento, en el cual se selecciona la frecuencia independiente ya que es lo recomendado por el programa. (Véase la figura 29) Al darle continuar, se llega al análisis de control en donde se configura el número de iteraciones, el SSR y otros parámetros de análisis, además seleccionas el estrato que quieres ver el comportamiento, ya sea en superficie o en cualquier otro estrato. (Véase la figura 30)

Viscous/Small-Strain Damping Definition

Figura 29 Frecuencia independiente

Figura 30 Análisis de control

Luego al seleccionar análisis, se obtiene toda la información en el estrato donde solicitaste el análisis, ya sea los acelerogramas, el espectro, entre otros. (Véase la figura 31) luego de tener los resultados, el programa tiene la opción de exportar los datos en una tabla de Excel, en caso que así se requiera.

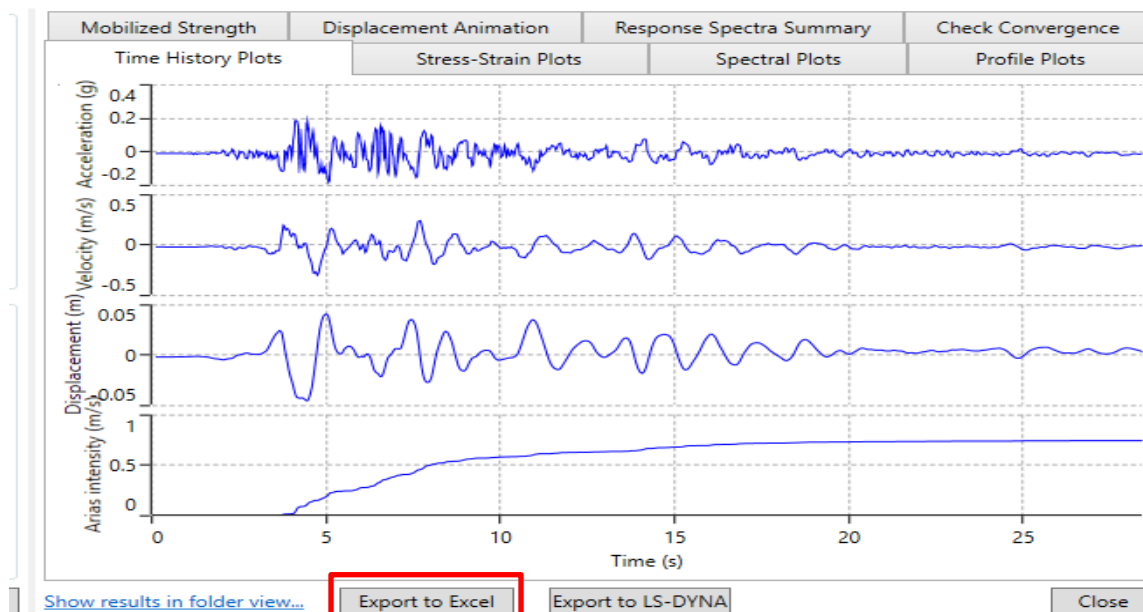


Figura 31. Análisis de respuesta del sismo

3.4.2 Perfil del suelo

Se utilizó el perfil de la TREASURE ISLAND con un V_s240 y periodo fundamental de 1,53 segundos (Véase la Figura 32), debido a que la licuación fue observada en ese sitio luego del Terremoto de Loma Prieta en 1989, las características de este perfil se pueden apreciar con mayor detalle en los Apéndices 4 y 5. Luego se consideraron otros dos perfiles predeterminados cambiando las propiedades de los suelos originales con un V_s100 , cuyo periodo fundamental es de 3,68 (Véase la figura 33) y otro perfil con $V_s 350$ con un periodo fundamental de 1,05 (Véase la figura 34). Cabe destacar que todos los perfiles tienen la misma profundidad de 92 metros para ver el comportamiento de las intensidades y de los espectros de los mismos sismos en esos perfiles diferentes.

Espesor m	Peso especifico KN/m3	Vs m/seg
2,5	18.8	175
6,5	18.8	134
4,5	18.8	178
5	17.3	178
3	17.3	207
7,5	17.3	165
4,5	17.9	317
30	20.1	267
11,5	18.1	267
13	18.7	386
4	19.6	1150
Roca		

Figura 32 Perfil del Suelo Treasure Island. Profundidad 92m

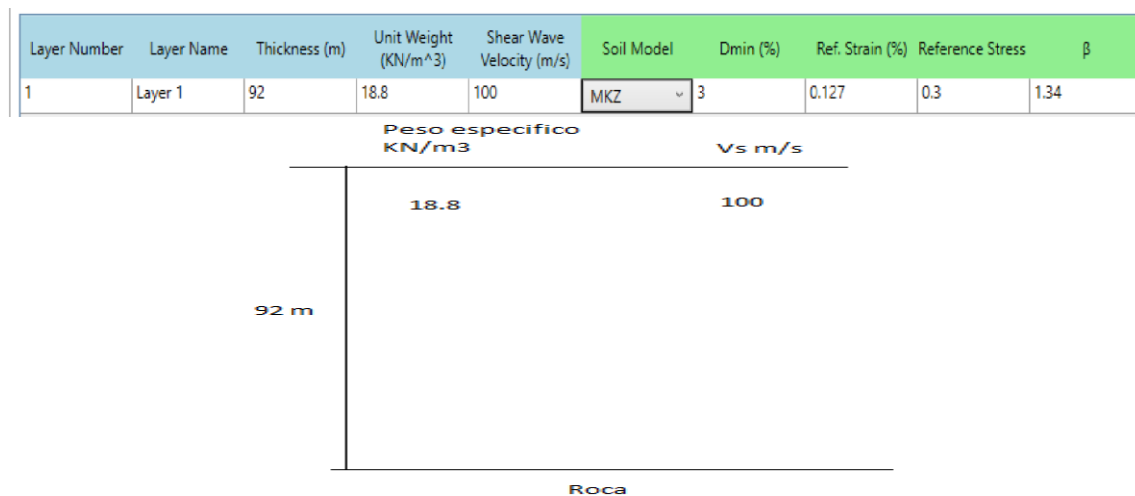


Figura 33. Perfil Predeterminado de Vs100

Layer Number	Layer Name	Thickness (m)	Unit Weight (KN/m ³)	Shear Wave Velocity (m/s)	Soil Model	Dmin (%)	Ref. Strain (%)	Reference Stress	β
1	Layer 1	92	18.1	350	MKZ	3	0.196	0.3	0.6

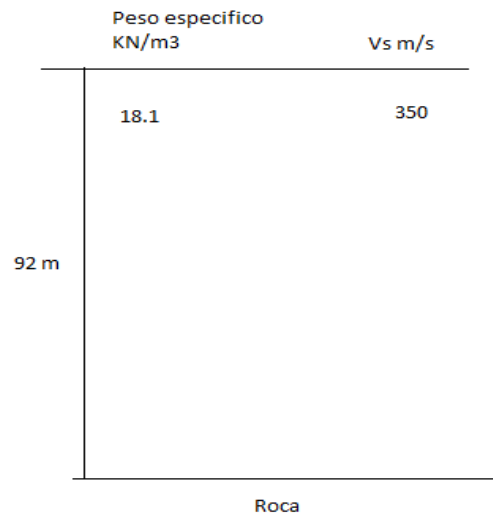


Figura 34. Perfil Predeterminado de Vs350

3.4.3 Intensidades en superficie

Las intensidades de los acelerogramas fueron calculados con el método que define la duración del sector fuerte de Echezuria, el cual fue explicado anteriormente. Una vez calculadas las intensidades se preparó una Tabla para cada perfil (Tablas 3, 4, 5) en donde se aprecian las intensidades en roca y en superficie, además las aceleraciones, magnitudes y distancias epicentrales, las cuales se indican a continuación:

Tabla 3 Intensidades y aceleraciones en Teasure Island

Distancia Epicentral (Km)	Magnitud	Ism roca (cm^2/s^3)	Ism superfi (cm^2/s^3)	apico roca (g)	apico super (g)
0.74	5.30	9,777.66	14,219.89	0.42	0.23
15.28	5.90	16,012.21	43,894.36	0.17	0.20
4.33	5.20	26,294.87	88,137.75	0.29	0.35
12.56	6.06	71,457.64	117,163.33	0.43	0.39
25.88	6.54	20,555.03	90,869.49	0.14	0.19
79.59	6.88	549.50	6,429.03	0.03	0.06
93.70	7.00	11,090.93	47,171.40	0.08	0.16
135.00	7.62	2,485.71	37,565.09	0.03	0.10
42.30	6.61	123,811.20	111,465.90	0.53	0.27
5.57	5.34	13,576.82	29,494.00	0.29	0.30
55.82	7.30	26,472.54	227,721.21	0.12	0.32
69.21	7.28	38,905.50	195,641.99	0.15	0.27
89.76	7.35	8,461.47	46,059.44	0.10	0.17

Tabla 4 Intensidades y aceleraciones en Suelo con Vs100

Distancia Epicentral (Km)	Magnitud	Ism roca (cm^2/s^3)	Ism superfi (cm^2/s^3)	apico roca (g)	apico super (g)
0.74	5.30	9,777.66	729.06	0.417	0.067
15.28	5.90	16,012.21	1,580.62	0.165	0.034
4.33	5.20	26,294.87	2,287.30	0.287	0.059
12.56	6.06	71,457.64	1,233.42	0.430	0.052
25.88	6.54	20,555.03	2,172.77	0.140	0.050
79.59	6.88	549.50	957.02	0.029	0.028
93.70	7.00	11,090.93	3,743.33	0.076	0.044
135.00	7.62	2,485.71	2,290.55	0.026	0.066
42.30	6.61	123,811.20	656.74	0.532	0.027
5.57	5.34	13,576.82	1,178.99	0.287	0.060
55.82	7.30	26,472.54	4,886.87	0.122	0.047
69.21	7.28	38,905.50	5,636.54	0.146	0.026
89.76	7.35	8,461.47	1,478.72	0.105	0.024

Tabla 5 Intensidades y aceleraciones en Suelo con Vs350

Distancia Epicentral (Km)	Magnitud	Ism roca (cm ² /s ³)	Ism superfi (cm ² /s ³)	apico roca (g)	apico super (g)
0.74	5.30	9,777.66	60,382.83	0.417	0.528
15.28	5.90	16,012.21	57,147.03	0.165	0.296
4.33	5.20	26,294.87	101,592.31	0.287	0.466
12.56	6.06	71,457.64	174,867.40	0.430	0.434
25.88	6.54	20,555.03	130,544.02	0.140	0.330
79.59	6.88	549.50	4,664.36	0.029	0.052
93.70	7.00	11,090.93	64,144.73	0.076	0.173
135.00	7.62	2,485.71	56,517.55	0.026	0.099
42.30	6.61	123,811.20	117,031.60	0.532	0.555
5.57	5.34	13,576.82	33,562.06	0.287	0.316
55.82	7.30	26,472.54	191,800.31	0.122	0.322
69.21	7.28	38,905.50	183,260.44	0.146	0.262
89.76	7.35	8,461.47	37,082.49	0.105	0.160

3.5 Energía necesaria para obtener la licuación de arenas

Para estimar la energía necesaria capaz de licuación las arenas presentes en los distintos perfiles se tomaron, por una parte, los valores de intensidades calculadas a partir de ensayos de laboratorio disponibles en la literatura con amplitud constante y número de ciclos controlados por la magnitud para arenas con distintas densidades relativas. Por otra parte, también se calculó la intensidad correspondiente a la amplitud promedio de 0,65 $\tau_{\max}$ y el número de ciclos correspondiente a cada magnitud. Estos valores resultaron bastante cercanos e indican la energía que debe poseer un sismo para que el suelo licue dependiendo de la magnitud (ver figura 35). Los mismos fueron proveídos por Echezuria en comunicación personal (notas personales).

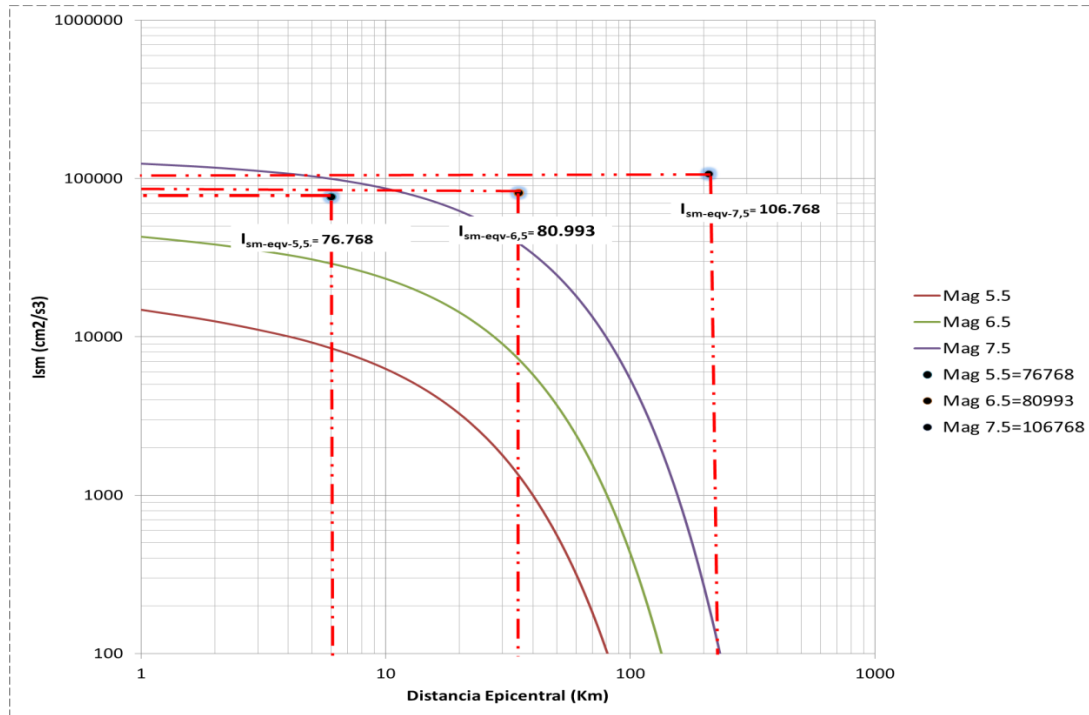


Figura 35 Valores Limites de Intensidad para Licuación

3.6 Comparación de las intensidades de los sismo con CSR

Para realizar dicha comparación se calcularon los CSR con el τ_{max} de cada uno de los sismos utilizados con la formula $\tau_{max} = 0,65 * \frac{a}{g} * \sigma_{total} * R_d$ en donde:

a: aceleración pico g: gravedad σ : Esfuerzo total R_d : Factor de profundidad

Para el factor R_d se consideró una profundidad de 10 m, y se utilizó el siguiente grafico para establecer su valor, dando un valor aproximado de 0.98

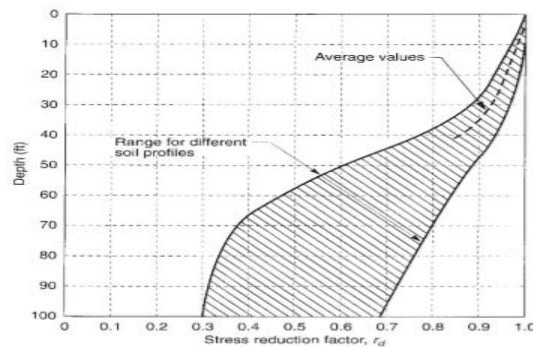


Figura 36 Factor de reducción con respecto a la profundidad. (Kramer, 1996)

Una vez calculado ese valor se procede a calcular el CSR con la siguiente formula:

$$CSR = \frac{\tau_{max}}{\sigma_{efectivo}}$$

Luego de calcularlo, se corrigió para pasarlo a $CSR_{7,5}$ graficando los siguiente parámetros sugeridos por el método de Seed e Idriss:

Magnitudo, M	$CSR_M/CSR_{M=7.5}$
$5\frac{1}{4}$	1.50
6	1.32
$6\frac{3}{4}$	1.13
$7\frac{1}{2}$	1.00
$8\frac{1}{2}$	0.89

Figura 37 Factor de CSR con $CSR_{7,5}$. (Kramer, 1996)

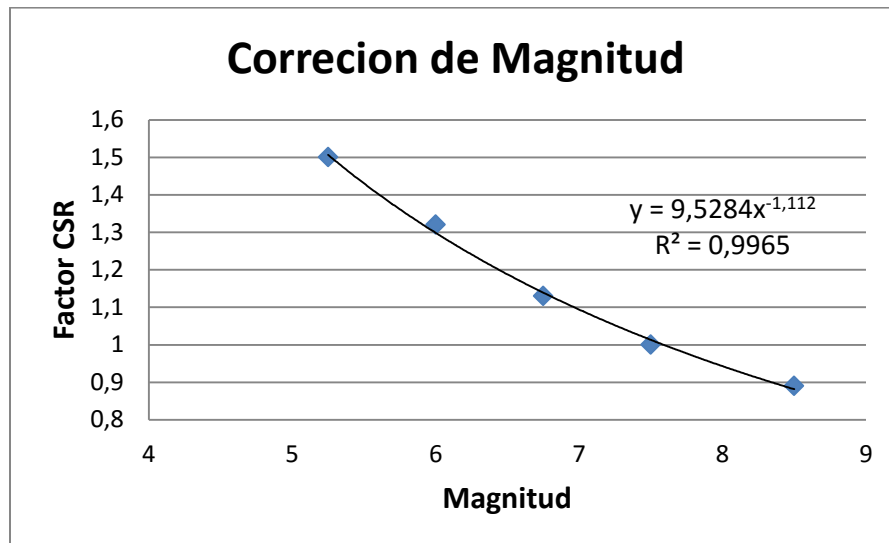


Figura 38. Curva para factor CSR a $CSR_{7,5}$

Una vez ajustado el $CSR_{7,5}$ a los valores de magnitud correspondientes, se compara con la figura 39 para evaluar si el mismo está dentro de los límite de licuación, a la izquierda de la línea divisoria.

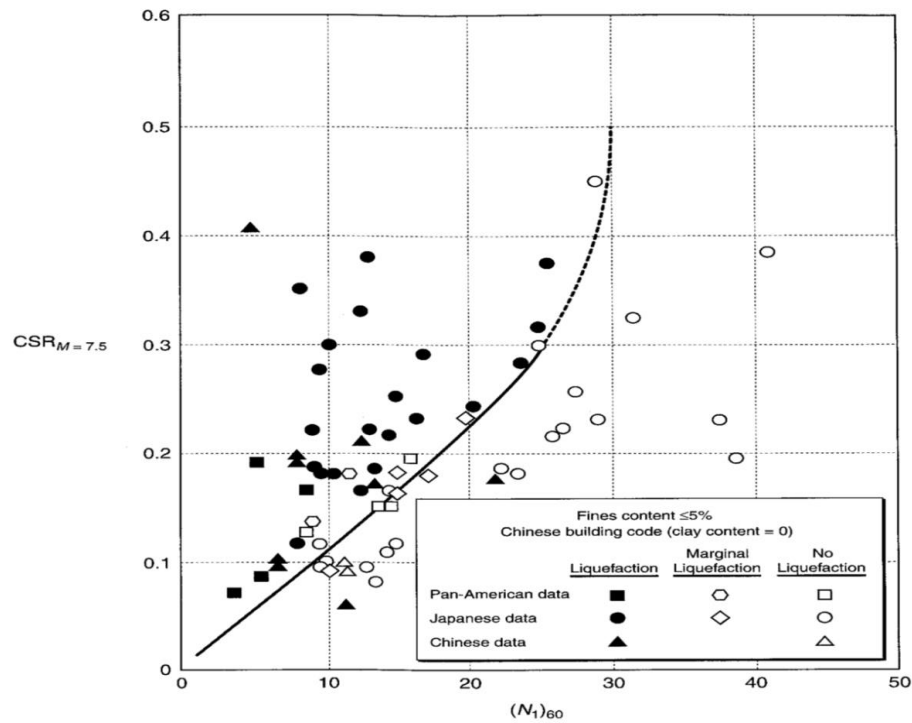


Figura 39 Relación entre el esfuerzo cíclico con respecto al $N_{1,60}$ del perfil para estimar licuación. (Kramer, 1996)

Para estimar el valor de $N_{1,60}$ se utilizó una correlación de COVENIN 1756:82 que proporciona correlaciones de dicho parámetro con el ensayo SPT a partir de un total 756 mediciones con un ajuste a los datos (R^2) de 0,87; obteniendo así la siguiente correlación:

$$V_s = 89,8 * N_{1(60)}^{0.341}$$

Al sustituir el valor de V_s se obtendrá el valor de $N_{1,60}$ y así estimar el valor de $CSR_{7,5}$

Capítulo 4

Presentación y Análisis de Resultados

Se realizaron los cálculos, comparaciones y análisis necesarios para poder cumplir los objetivos y llegar a una conclusión general del comportamiento del suelo a través del sismo.

4.1 Intensidades en Roca

Como primer análisis, una vez obtenidas las duraciones de los sectores fuertes de los acelerogramas, se calcularon las intensidades del sector fuerte cuyos valores se muestran en los Apéndices del 6 al 14. Luego, se compararon las intensidades y duraciones para cada método como se muestran en las Figuras 40, 41, 42 utilizando una recta de 45 grados para ver su relación. Estas comparaciones se hicieron para los 107 sismos cuyas magnitudes están entre 5 y 8.

Se observa en las Figuras 40, 41, 42 que aunque existe mucha dispersión entre los tiempos en segundos para el sector fuerte del sismo, las intensidades resultan bastante parecidas. Esto fue detectado y discutido por Echezuría, lo cual lo llevó a analizar de nuevo varias de las definiciones para el sector fuerte de un sismo y unificar los criterios al respecto con un nuevo método que resulta muy similar al de McCann-Shah.

Es oportuno destacar que algunas duraciones en el método de Bolt resultan con valor cero, y esto se debe a que no existían aceleraciones mayores a 0.05g en esos sismos. Esto pasa mucho con sismos de baja magnitud, y sugiere que este método tiene limitaciones para obtener algunas intensidades.

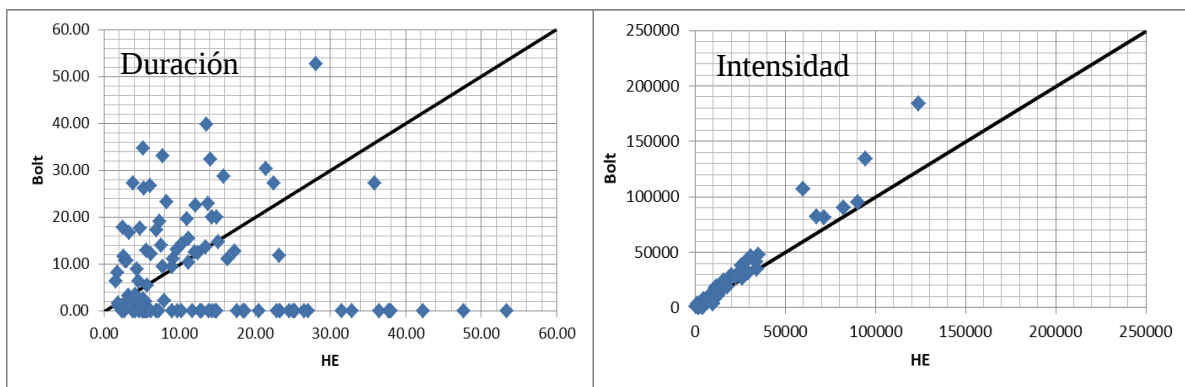


Figura 40 Comparación entre Bolt y Echezuria. Magnitudes entre 5-8

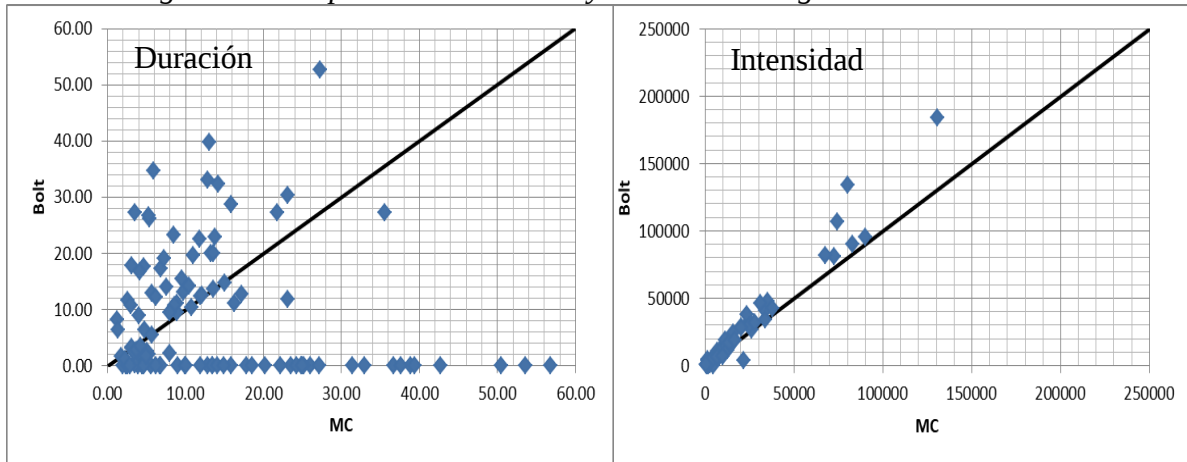


Figura 41 Comparación entre Bolt y MCann. Magnitudes entre 5-8

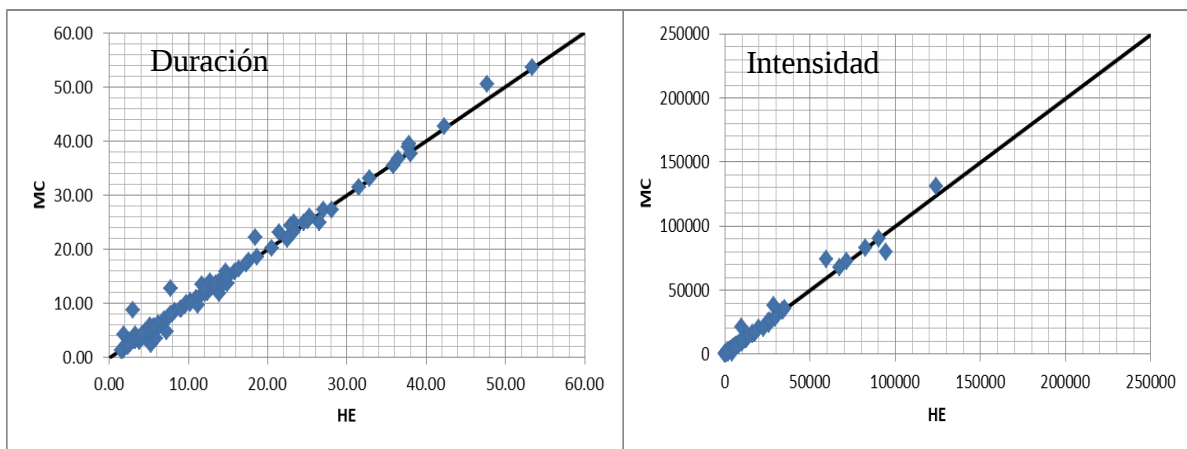


Figura 42 Comparación entre MCann y Echezuria. Magnitudes entre 5-8

4.2 Relación de las aceleraciones pico en las dos direcciones del sismo

Como se había mencionado, se obtuvieron los acelerogramas en roca en las dos direcciones horizontales para cada sismo, por lo que se calcularon las intensidades y duraciones en ambos sentidos y se compararon con las aceleraciones máximas del terreno. Este análisis indica que el acelerograma con mayor aceleración del terreno no siempre está directamente vinculado a la mayor intensidad.

Esto se muestra en las Figuras 43, 44, 45, donde se grafican los cocientes entre las intensidades y los cocientes entre las aceleraciones máximas del terreno con la distancia epicentral para rangos de magnitudes 5-5.9; 6-6.9 y 7-7.9; respectivamente.

Los puntos rojos de los gráficos equivalen al cociente de la aceleración pico mayor entre la aceleración pico del otro sentido, lo cual resulta siempre mayor que 1. Mientras que los puntos azules corresponden al cociente de la intensidad en la dirección de la aceleración pico mayor entre la intensidad en otro sentido. Cuando la relación de las intensidades (punto azul) es menor que 1, significa que la intensidad mayor no corresponde con la aceleración pico mayor.

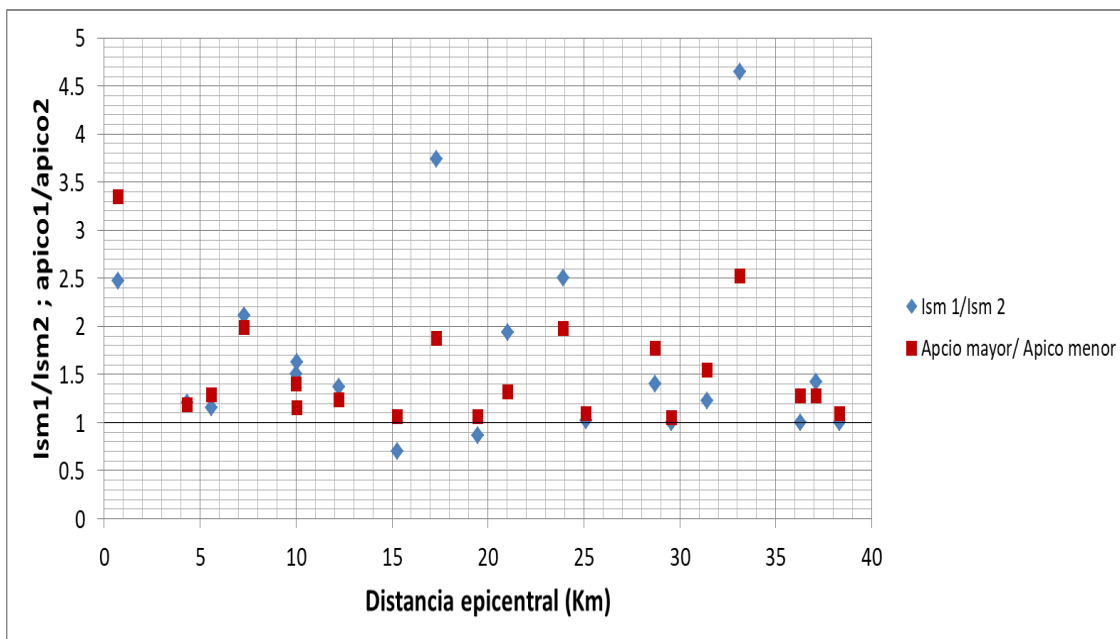


Figura 43 Comparación de cocientes de Intensidades con cocientes de aceleraciones máximas del terreno para M 5-5.9

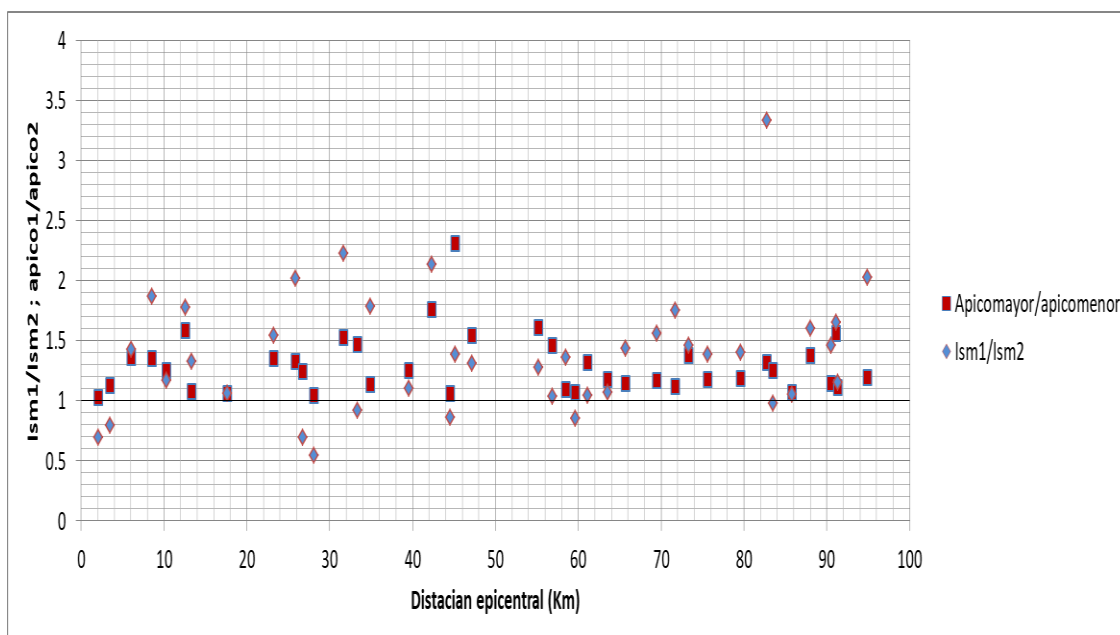


Figura 44 Comparación apico con intensidad mayor M 6-6.9

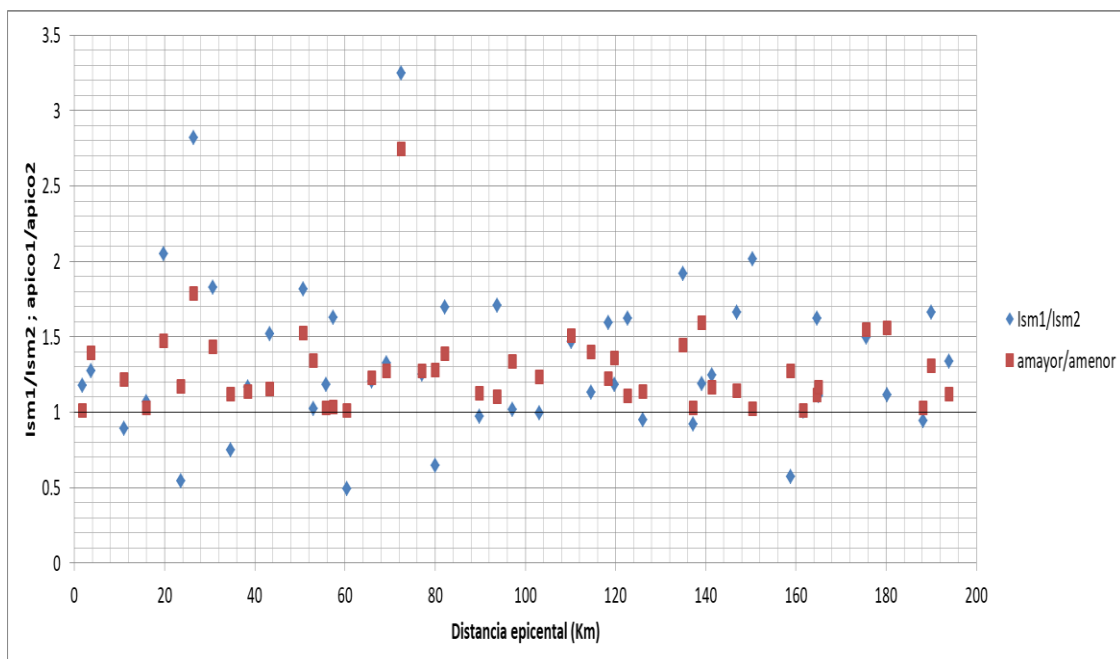


Figura 45 Comparación apico con intensidad mayor M 7-7.9

Se observa que a medida que la magnitud aumenta, también aumenta la no coincidencia entre la mayor aceleración con la mayor intensidad del sector fuerte del sismo. Por ende, al tener registros en dos direcciones no se pueden descartar directamente aquellos que poseen la menor aceleración pico. También se puede apreciar que cuando la relación entre las aceleraciones pico es mayor que aproximadamente 1,5 las intensidades si corresponden con las aceleraciones pico mayores.

4.3 Resultados de la Ley de Atenuación

Tal como se esperaba, las intensidades obtenidas de los acelerogramas en roca disminuyen con la distancia epicentral como se ilustra en la Figura 46.

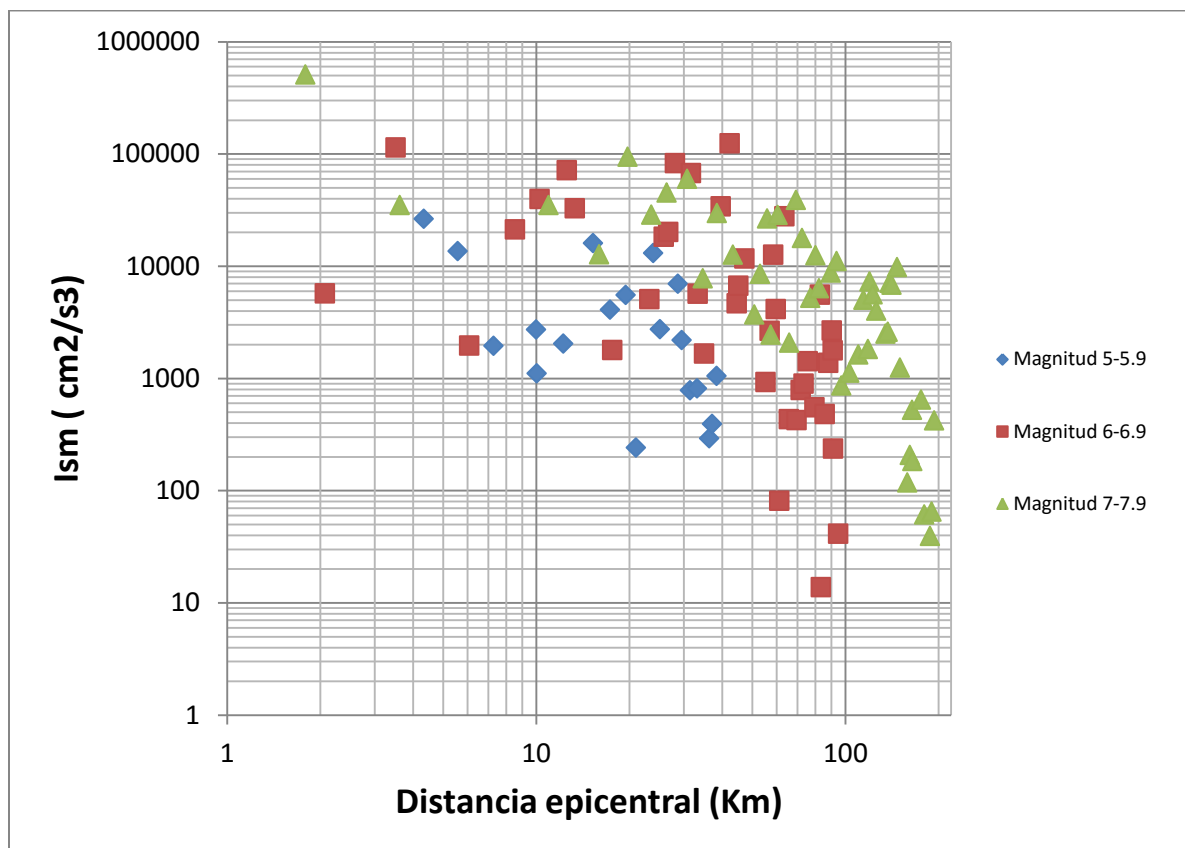


Figura 46 Ism Vs Distancia epicentral. Magnitud 5-7.9

Los modelos utilizados considerando el proceso físico para el ajuste fueron las siguientes con su correspondiente bondad de ajuste (R^2) y desviación estándar:

Tabla 6 Modelos de curvas para regresión

	R^2	Desv.
Función: $Y = A+B*MAG+C*\log_{10}((RE^2+h^2)^{(1/2)})+D*((RE^2+h^2)^{(1/2)})$	0.588	0.563
Función: $Y = A+B*MAG+C*\log_{10}(RE^{(D*MAG)})$	0.477	0.634
Función: $Y = A+B*MAG+C*\log_{10}(RE)+D*RE$	0.591	0.561
Función: $Y = A+B*(MAG^{(E/RE)})+C*\log_{10}(RE)+D*RE$	0.345	0.714
Función: $Y = A+B*(MAG^{(E)})+C*\log_{10}(RE)+D*RE$	0.587	0.566
Función: $Y = A+B*MAG+C*\log_{10}(RE)+D*(RE+20)$	0.591	0.561
Función: $Y = A+B*(MAG+E)+C*\log_{10}(RE)+D*(RE)$	0.514	0.629
Función: $Y = A+B*MAG+C*\log_{10}(RE+E)+D*(RE+E)$	0.584	0.569
Función: $Y = A+B*MAG+(C+D*MAG)*\log_{10}(RE)+(E+F*MAG)*RE$	0.615	0.550

El modelo seleccionado de la regresión múltiple no lineal es el último mostrado en la Tabla anterior ya que tiene la menor desviación estándar y la mejor bondad del ajuste. Sus constantes se muestran a continuación y su representación gráfica para magnitudes 5, 6 y 7 con sus desviaciones estándar y los datos utilizados se presentan en las Figuras 47, 48 y 49. La Figura 50 muestra las curvas para los valores medios de las magnitudes 5, 6 y 7, respectivamente.

$$\log I_{sm} = A+B*MAG+(C+D*MAG)*\log_{10}(RE)+(E+F*MAG)*RE$$

A	1.6851
B	0.4563
C	-0.5011
D	0.0614
E	-0.0519
F	0.0052

En donde:

RE= Distancia epicentral

MAG= Magnitud

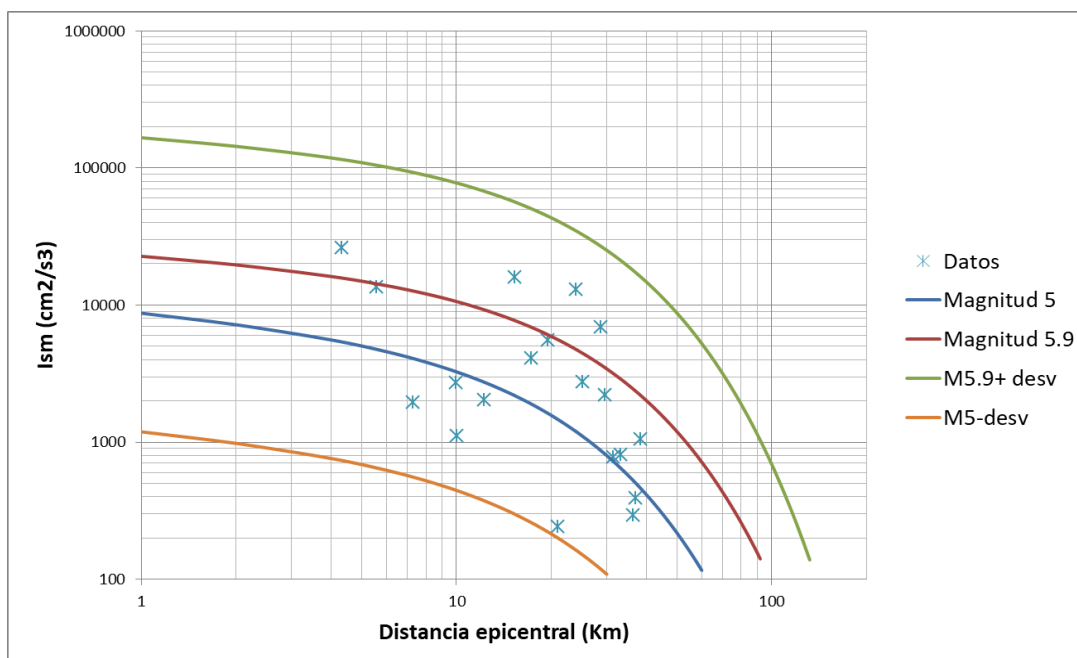


Figura 47 Magnitud 5-5.9 con desviación

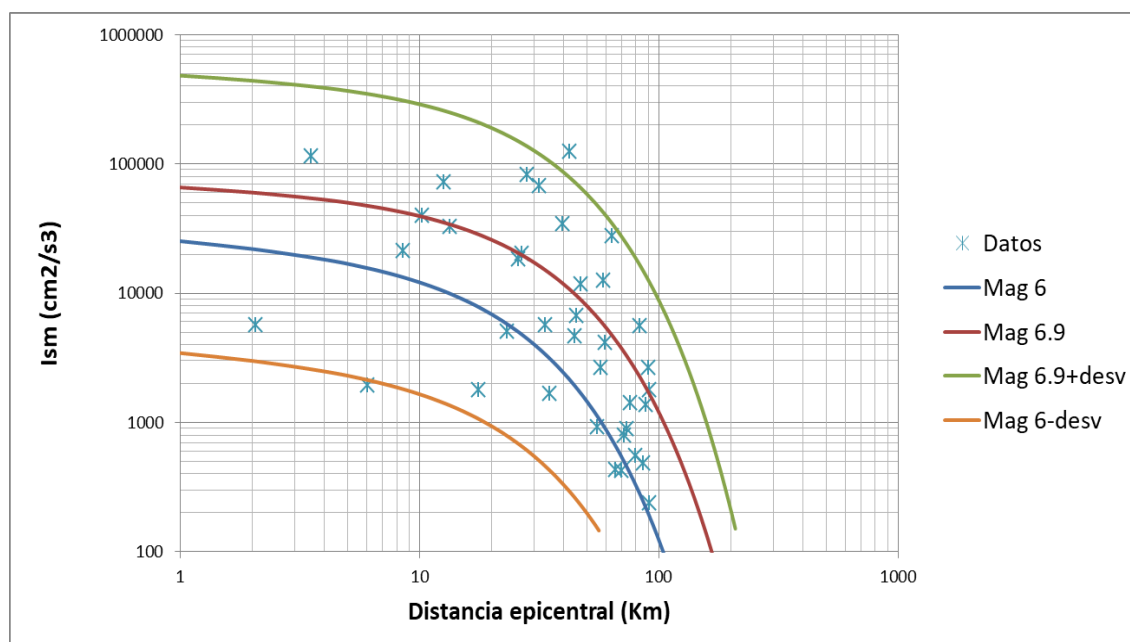


Figura 48 Magnitud 6-6.9 con desviación

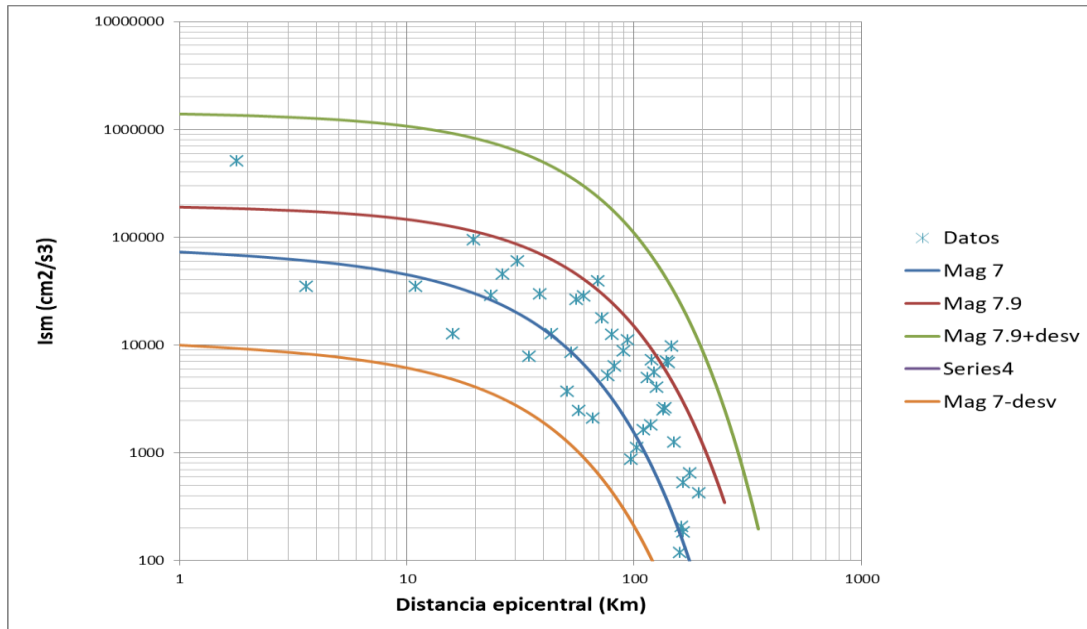


Figura 49 Magnitud 7-7.9 con desviación

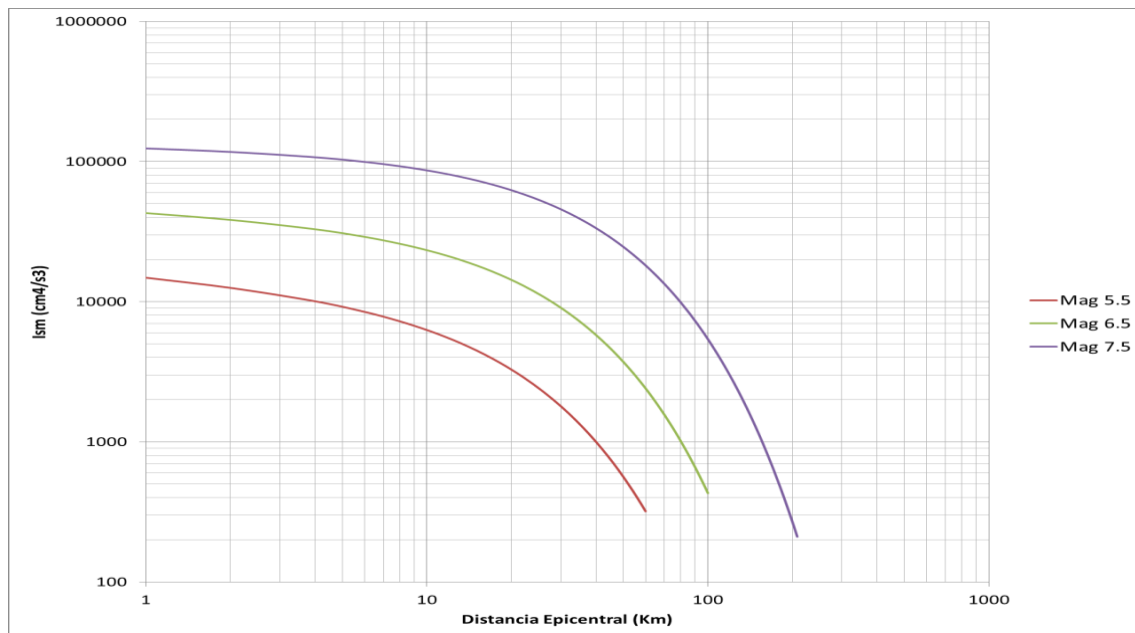


Figura 50 Ley de atenuación con mejor ajuste para medias de magnitudes 5, 6 y 7, respectivamente

4.4 Análisis de Intensidades en Roca y en superficie

4.4.1 Treasure Island

Una vez obtenidos los acelerogramas en superficie para cada perfil, se calcularon las intensidades con el método de Echezuria y fueron comparados con las intensidades en roca. También se compararon esas intensidades con los valores de las intensidades requeridos para producir la licuación a partir de ensayos de laboratorio y de valores a base de 0,65 de $\tau_{\max}$.

Estos últimos valores fueron para M 5,5 - $I_{sm}= 76.768$; para M 6,5 - $I_{sm}=80.993$ y para M 7,5= 106.768 . Las unidades de I_{sm} son cm^2/s^3 .

Tabla 7 Variación de Intensidad roca-Superficie. Perfil Treasure Island

RE	M	Ism roca	Ism superficie	apico roca g	apico super g	Ism necesaria para licuar	licua
0.74	5.30	9,777.66	14,219.89	0.42	0.23	76,768	No
15.28	5.90	16,012.21	43,894.36	0.17	0.20	76,768	No
4.33	5.20	26,294.87	88,137.75	0.29	0.35	76,768	si
12.56	6.06	71,457.64	117,163.33	0.43	0.39	80,993	si
25.88	6.54	20,555.03	90,869.49	0.14	0.19	80,993	si
79.59	6.88	549.50	6,429.03	0.03	0.06	80,993	No
93.70	7.00	11,090.93	47,171.40	0.08	0.16	106,768	No
135.00	7.62	2,485.71	37,565.09	0.03	0.10	106,768	No
42.30	6.61	123,811.20	111,465.90	0.53	0.27	80,993	si
5.57	5.34	13,576.82	29,494.00	0.29	0.30	76,768	No
55.82	7.30	26,472.54	227,721.21	0.12	0.32	106,768	si
69.21	7.28	38,905.50	195,641.99	0.15	0.27	106,768	si
89.76	7.35	8,461.47	46,059.44	0.10	0.17	106,768	No

Como se puede ver en la Tabla 7, solo 6 sismos poseen la energía necesaria para que ocurra licuación en el perfil original de Treasure Island. Nótese también que hubo amplificación de la intensidad para la mayoría de los sismos, por lo que algunos lograron sobrepasar los valores para licuar. Es oportuno destacar que a las distancias límites a las cuales se ha observado la licuación los valores de las intensidades en roca son

relativamente bajas debido a la atenuación. Es precisamente la amplificación de la intensidad del sector fuerte del sismo lo que hace que se alcance la ocurrencia de ese fenómeno. Solo en uno de los casos estudiados no hubo amplificación, sin embargo, la intensidad resultante fue suficientemente alta para causar la licuación. Véase la fila 9 de la Tabla 7. Esto también puede verse en la Figura 51.

Nótese que en la figura 52, la mayoría de las aceleraciones máximas del terreno también aumentan y siguen el patrón descrito por Idriss. (Véase la figura 19)

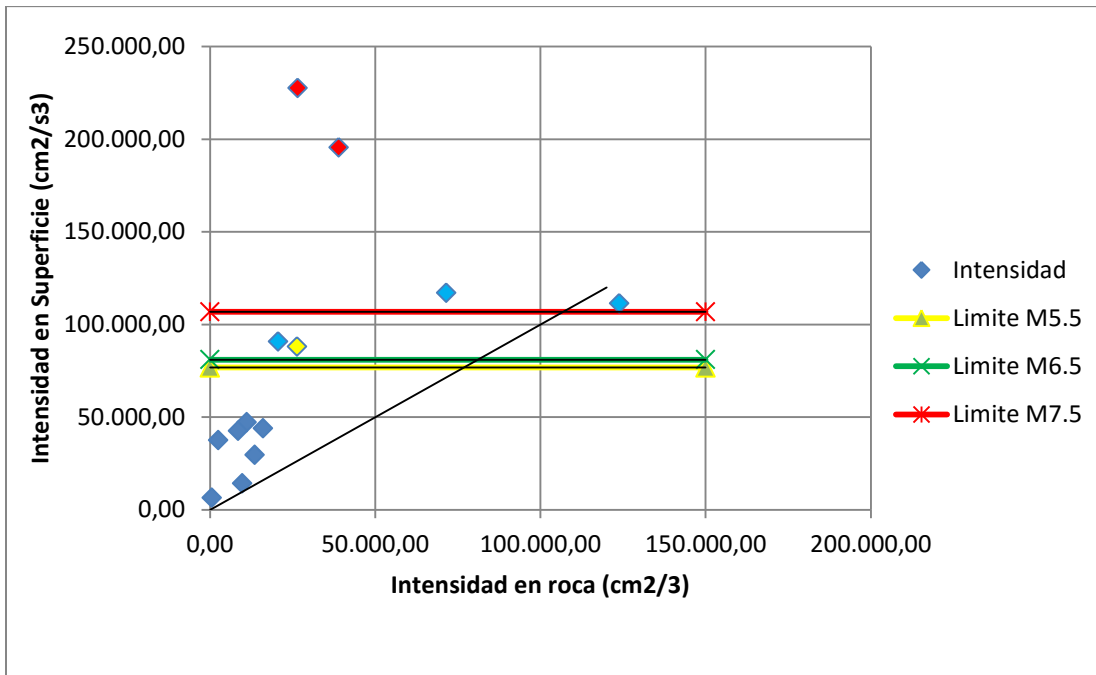


Figura 51 Intensidad en Superficie Vs Intensidad en Roca

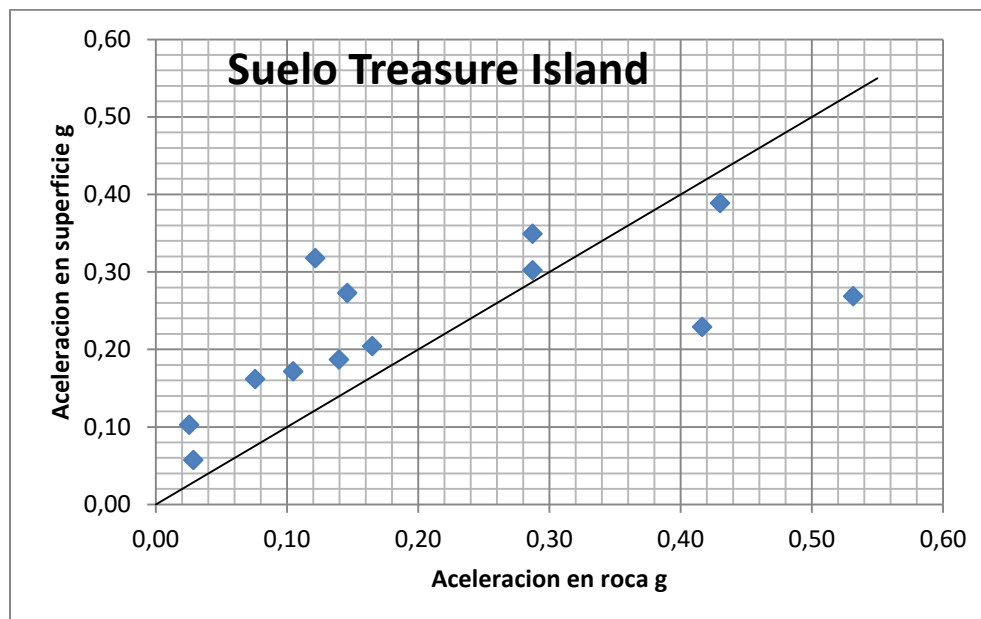


Figura 52 Aceleración pico super Vs Aceleración pico roca. Treasure Island

4.4.2 Perfil de Treasure Island modificado con $V_s=100$ m/s

Para este caso con $V_s=100$ m/s se produjo una reducción en todos los sismos estudiados, es decir, este nuevo perfil reduce significativamente las aceleraciones sísmicas a pesar de ser un suelo blando potencialmente licuable en los primeros 20 m. Lo anterior sugiere que no siempre esta condición de un perfil que reduce significativamente las aceleraciones es detectado por el V_{s30} que se ha popularizado en la práctica de la ingeniería, sino que es necesario verificar las condiciones del perfil hasta profundidades de al menos unos 50 m o más, es decir, hasta encontrar velocidades superiores a los 500-700 m/s.

En este caso, ninguno de los sismos alcanzó niveles de intensidad del sector fuerte para generar la licuación. Esto se observa en la Tabla 8. Para el perfil en estudio el periodo fundamental del suelo es muy alto y causa la reducción de todas las ordenadas espectrales del sismo. Esto se tratará con más detalle en las próximas secciones de este TEG.

Tabla 8 variación de Intensidad roca-Superficie. Perfil Vs 100

RE	M	Ism roca	Ism super	apico roca	apico super	Ism necesaria para licuar	licua
0.74	5.30	9,777.66	729.06	0.0425	0.0069	76,768	No
15.28	5.90	16,012.21	1,580.62	0.0168	0.0035	76,768	No
4.33	5.20	26,294.87	2,287.30	0.0293	0.0060	76,768	No
12.56	6.06	71,457.64	1,233.42	0.0439	0.0053	80,993	No
25.88	6.54	20,555.03	2,172.77	0.0142	0.0051	80,993	No
79.59	6.88	549.50	957.02	0.0029	0.0029	80,993	No
93.70	7.00	11,090.93	3,743.33	0.0077	0.0045	106,768	No
135.00	7.62	2,485.71	2,290.55	0.0026	0.0067	106,768	No
42.30	6.61	123,811.20	656.74	0.0542	0.0027	80,993	No
5.57	5.34	13,576.82	1,178.99	0.0293	0.0062	76,768	No
55.82	7.30	26,472.54	4,886.87	0.0124	0.0048	106,768	No
69.21	7.28	38,905.50	5,636.54	0.0149	0.0026	106,768	No
89.76	7.35	8,461.47	1,478.72	0.0107	0.0024	106,768	No

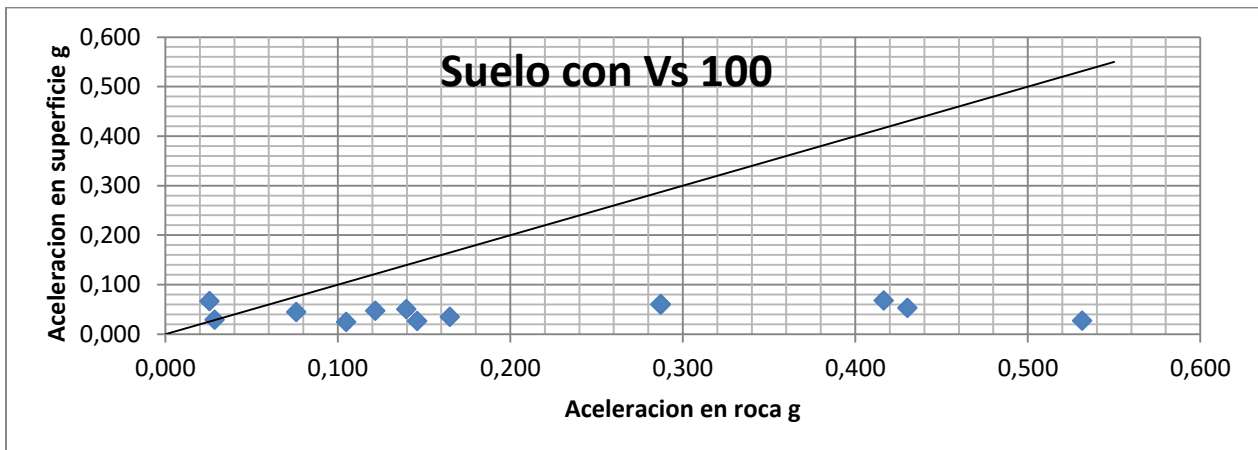


Figura 53 Aceleración en pico super. Vs 100

Aunque en este perfil no obtuvo energía suficiente para ocurrir licuación con los sismos escogidos, no quiere decir que nunca va a licuar, por ende se trabajó con 2 sismos adicionales, los cuales se encuentran por encima del límite de licuación según figura 23. Se ve en la Tabla 9 que ocurren grandes amplificaciones tanto en la intensidad como en las aceleraciones, llegando a obtener la energía suficiente para que el suelo licue.

Tabla 9 variación de Intensidad roca-Superficie. Perfil Vs 300. Sismos adicionales

RE	M	Ism roca	Ism superficie	apico roca	apico super	Ism necesaria para licura	licua
0.07	6.63	106.771,64	1.610.302,49	0,45	0,68	80,993	Si
37.10	7.62	19.740,86	1.046.617,20	0,07	0,31	106,768	Si

4.4.3 Perfil de Treasure Island modificado con Vs=350 m/s

Este perfil causó amplificaciones importantes al igual que el perfil de Treasure Island y amplificó suficientemente la energía para causar licuación en los estratos superiores con los mismos 6 sismos que causaron licuación en el perfil original. Esto se ilustra en la Tabla 10.

Nótese también que, a pesar de que este perfil es más rígido, el mismo amplificó más las aceleraciones que el perfil original de Treasure Island. Véase la figura 54. De nuevo, estas diferencias no son perceptibles con la Vs₃₀.

Tabla 10 variación de Intensidad roca-Superficie. Perfil Vs 350

RE	M	Ism roca	Ism superficie	apico roca	apico super	Ism necesaria para licuar	licua
0.74	5.30	9,777.66	60,382.83	0.417	0.528	76,768	No
15.28	5.90	16,012.21	57,147.03	0.165	0.296	76,768	No
4.33	5.20	26,294.87	101,592.31	0.287	0.466	76,768	Si
12.56	6.06	71,457.64	174,867.40	0.430	0.434	80,993	Si
25.88	6.54	20,555.03	130,544.02	0.140	0.330	80,993	Si
79.59	6.88	549.50	4,664.36	0.029	0.052	80,993	No
93.70	7.00	11,090.93	64,144.73	0.076	0.173	106,768	No
135.00	7.62	2,485.71	56,517.55	0.026	0.099	106,768	No
42.30	6.61	123,811.20	117,031.60	0.532	0.555	80,993	Si
5.57	5.34	13,576.82	33,562.06	0.287	0.316	76,768	No
55.82	7.30	26,472.54	191,800.31	0.122	0.322	106,768	Si
69.21	7.28	38,905.50	183,260.44	0.146	0.262	106,768	Si
89.76	7.35	8,461.47	37,082.49	0.105	0.160	106,768	No

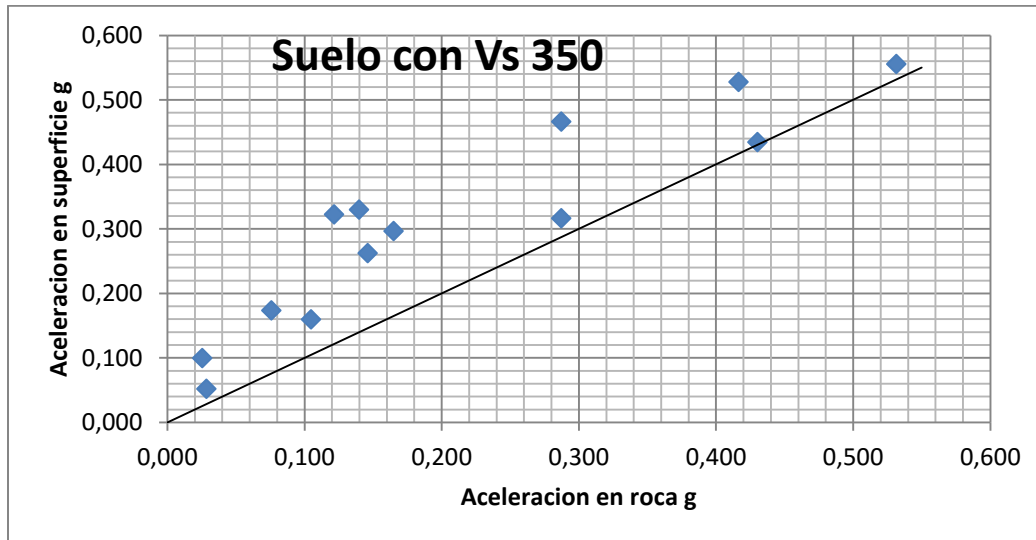


Figura 54 Aceleración en pico super. Vs 350

4.4.4 Análisis de susceptibilidad a la licuación considerando el CSR y la intensidad, la duración y los espectros en superficie

Una vez definidos sismos que produjeron licuación en las arenas sueltas contenidas en los primeros 20 m del perfil, se determinaron los espectros de los acelerogramas en superficie correspondientes para cada perfil geotécnico. Estos se compararon con los espectros en superficie de aquellos sismos que no produjeron la licuación, tal como se ilustra en la Figura 57 y 58, para el perfil de Treasure Island, figura 56. En dicha comparación se evidencia que las formas de dichos espectros son diferentes entre sí.

Esto nos sugiere que no es solamente la aceleración del terreno la que hace que se alcance la licuación en las arenas susceptibles en los primeros metros del perfil, sino que hay algo más relacionado con las ordenadas espectrales, las cuales muestran amplificación en las inmediaciones del período fundamental que no muestran los otros espectros.

La Tabla 11 muestra los valores del promedio de las aceleraciones espectrales, PAE, junto con su duración de la intensidad del sector fuerte y la Figura 59 los promedios de las aceleraciones espectrales separados por la línea que indica licuación por encima y no licuación por debajo de la misma.

Tabla 11 Promedios de las aceleraciones espectrales de los 3 perfiles junto con su duración de la intensidad (método Echezuria)

sismos	Treasure island		Vs100		Vs 350	
	PAE	duración	PAE	duración	PAE	duración
M6,54 -25,88	0.38255155	14.39	0.06329	12.2	0.47614056	10.69
M6,06-12.56	0.53284748	9.515	0.05816	6.865	0.65519212	12.23
M6,88-79,59	0.0952035	19.52	0.03897	20.12	0.04618224	17.22
M6,61-42,3	0.67694696	9.58	0.04230	16.12	1.03355213	4.55
M7,28-69,21	0.42351165	29.58	0.05779	30.38	0.42752574	23.94
M7,35-89,76	0.27611161	22.7	0.03202	21.24	0.24601566	22.1
M7-93,7	0.27813096	11.73	0.04539	46.9	0.2680151	15.9
M7,62-135	0.16581106	37.865	0.04347	33.255	0.15715124	39.665
M7.3-55.82	0.48212802	16.85	0.06487	22.32	0.45688721	21.01
M5,3-0,74	0.48107403	0.73	0.09866	0.63	0.8310379	1.12
M5.9-15.28	0.37414147	11.73	0.04725	11.065	0.4501597	10.555
M5.2-4,33	0.50754672	5.1	0.07055	6.4	0.61411348	6.2
M5,34-5,57	0.47644585	2.65	0.08953	2.34	0.54482846	1.98
<i>Sismos adicionales</i>			1.06966	18.655		
			0.43419	64.208		

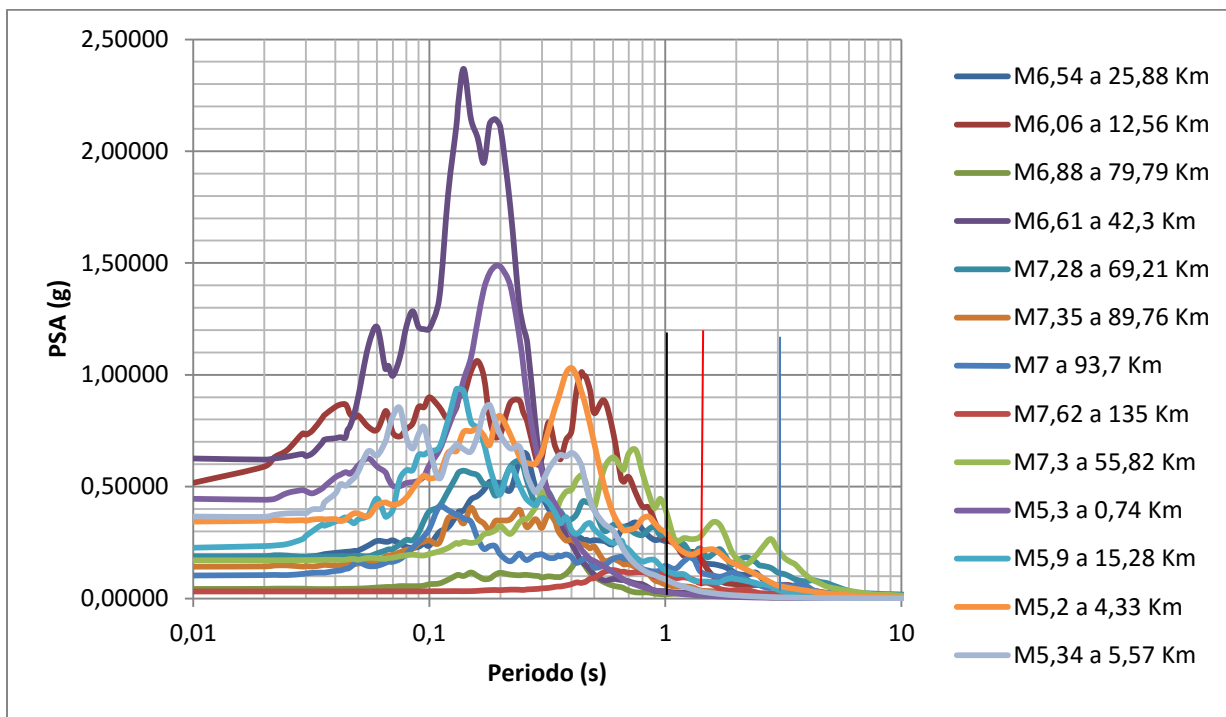


Figura 55 Espectros en Roca de los 13 sismos a evaluar

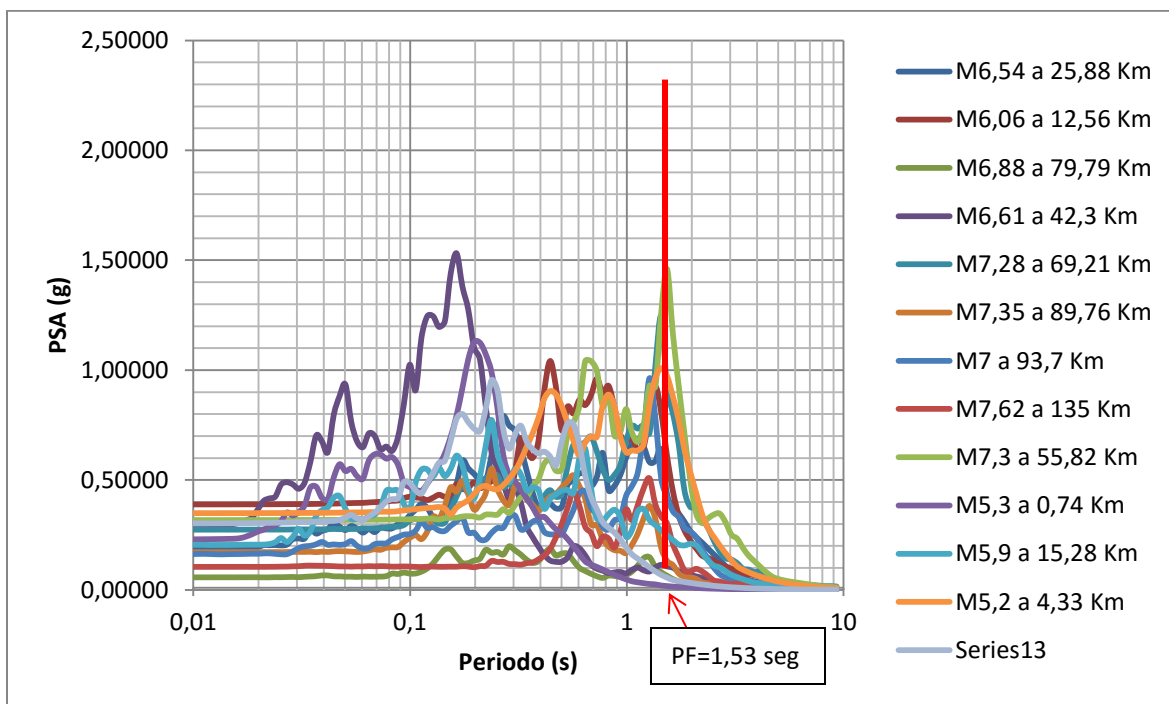
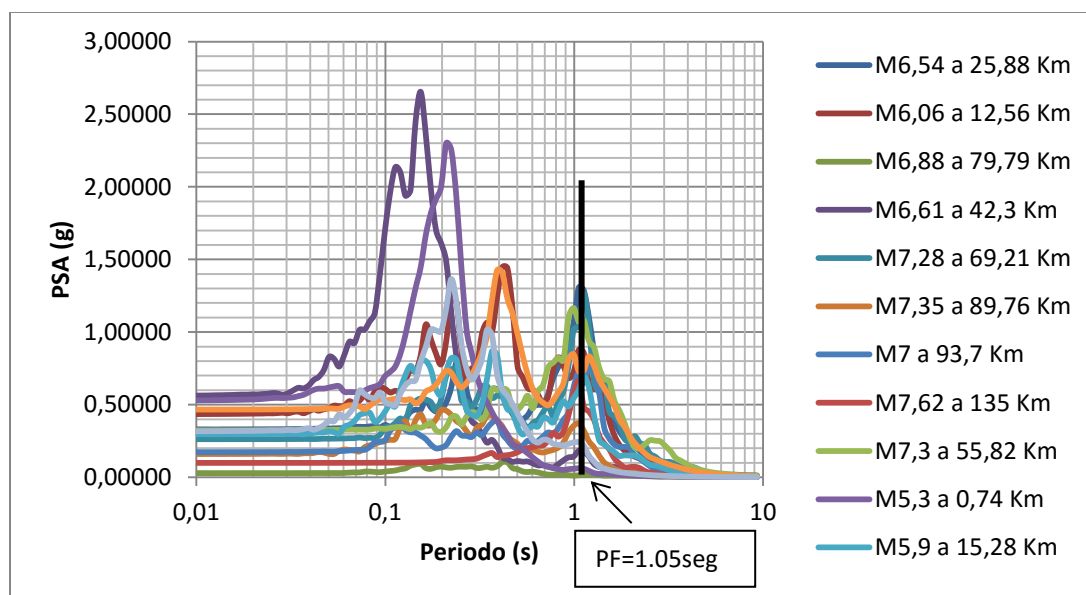
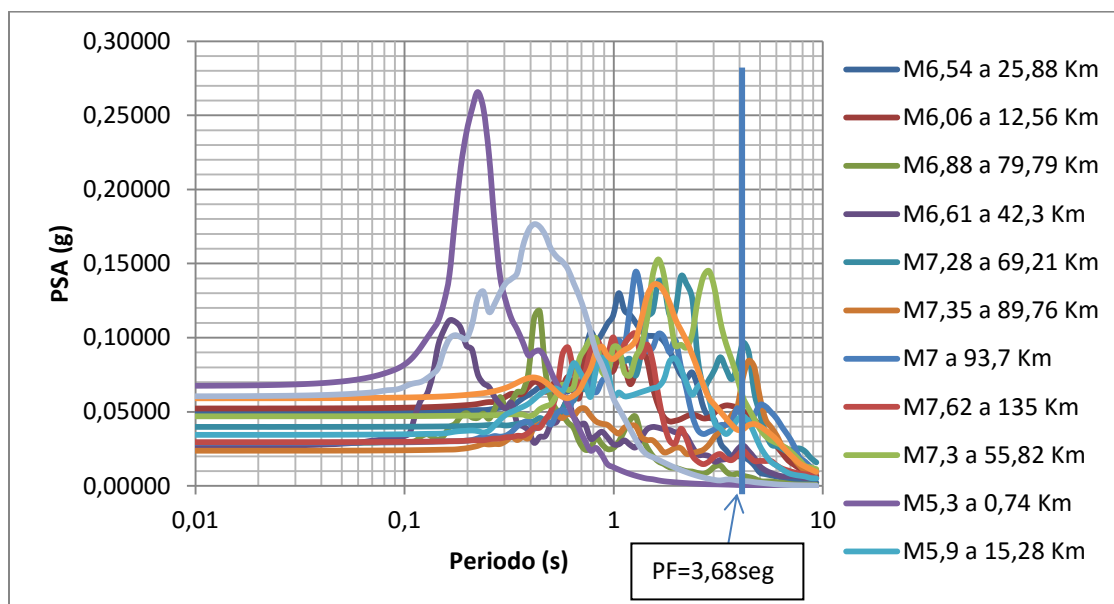


Figura 56 Espectro en Superficie, Treasure Island. Periodo fundamental 1,53 seg

Este mismo análisis se realizó para los otros perfiles con diferentes velocidades y períodos fundamentales lo cual se muestra en las Figuras 57 y para el perfil de $V_s=100$ y $T=3,68$ s y en la Figura 58 para el perfil con $V_s=350$ m/s y $T=1,05$ s.



En ambos perfiles se observa que las amplificaciones de las ordenadas espectrales ocurren en las inmediaciones del período fundamental de esos depósitos pero en el caso de $V_s=100$ m/s no logran suficiente amplificación para producir la licuación, mientras que en el perfil con $V_s=350$ m/s si se alcanzan, de acuerdo con los valores de las intensidades de los sismos en superficie mostrados en las Tablas 7, 8 y 10.

Como se mencionó anteriormente, se tomaron 2 sismos adicionales para estudiar el perfil con $V_s=100$, ya que además de estar por encima del límite de licuación, también poseen energía en el periodo fundamental del depósito (3,68seg) como se ve en la figura 59. Una vez obtenido los espectros en superficie de estos sismos adicionales, se pueden notar amplificaciones significativas en 2 de los sismos, como se muestra en la figura 60, estas amplificaciones ocurren justo en el periodo fundamental del suelo, produciendo así la energía necesaria para licuación.

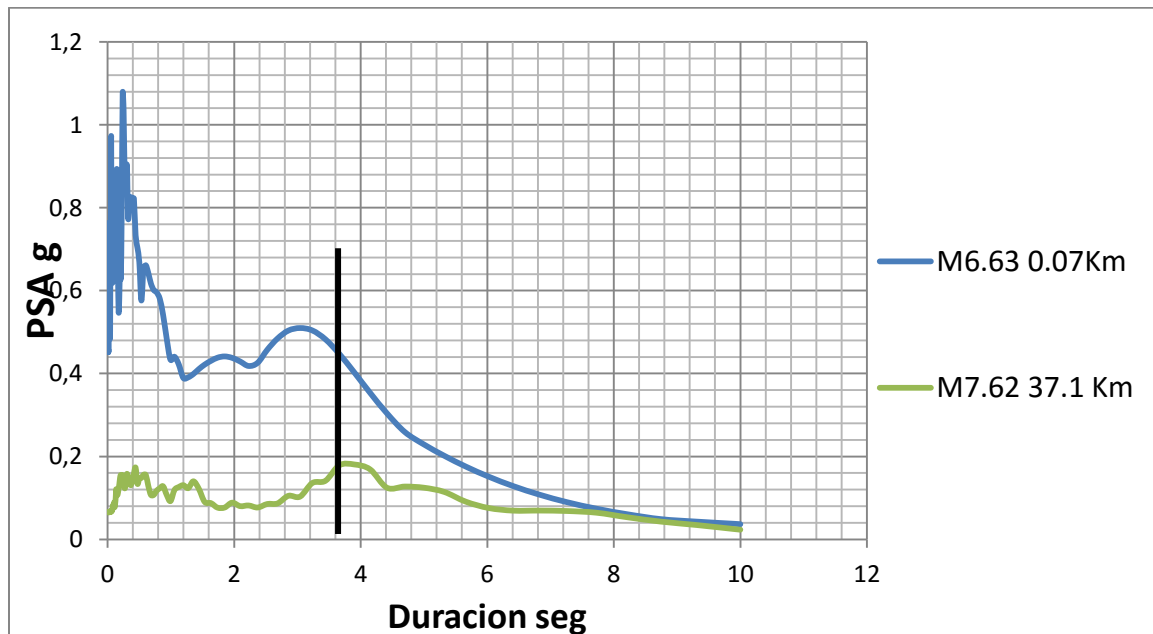


Figura 59 Espectro en Roca, V_s 100. Periodo fundamental 3,68 seg. Sismo adicional

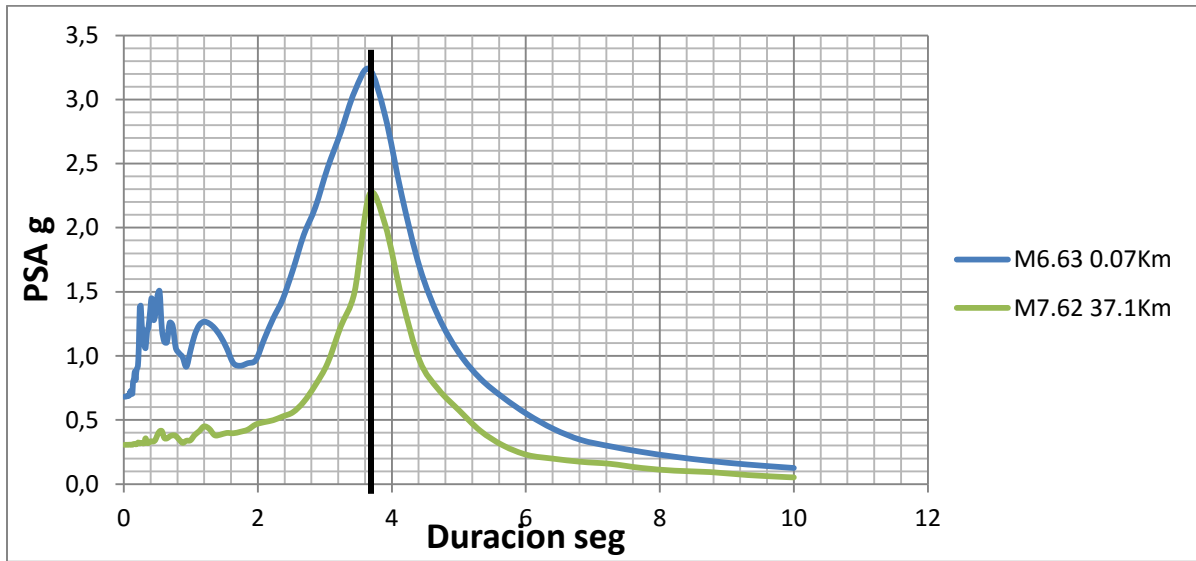


Figura 60 Espectro en Superficie, Vs 100. Periodo fundamental 3,68 seg. Sismo adicional

A tal efecto, se calculó el promedio de la aceleraciones espectrales iguales o mayores que la aceleración del terreno, las cuales se graficaron junto con la duración del sector fuerte del sismo en superficie obtenida con el método de Echezurúa.

Como se puede observar en la figura 61, todo valor cuyo promedio este por encima de la curva, se considera que ese sismo posee la energía necesaria para hacer que el suelo licue, este hallazgo es de gran importancia, porque se están utilizando sismos reales y se está considerando no solo las aceleraciones, sino también la intensidad del sector fuerte y además considera las amplificaciones producidas por el periodo fundamental del suelo.

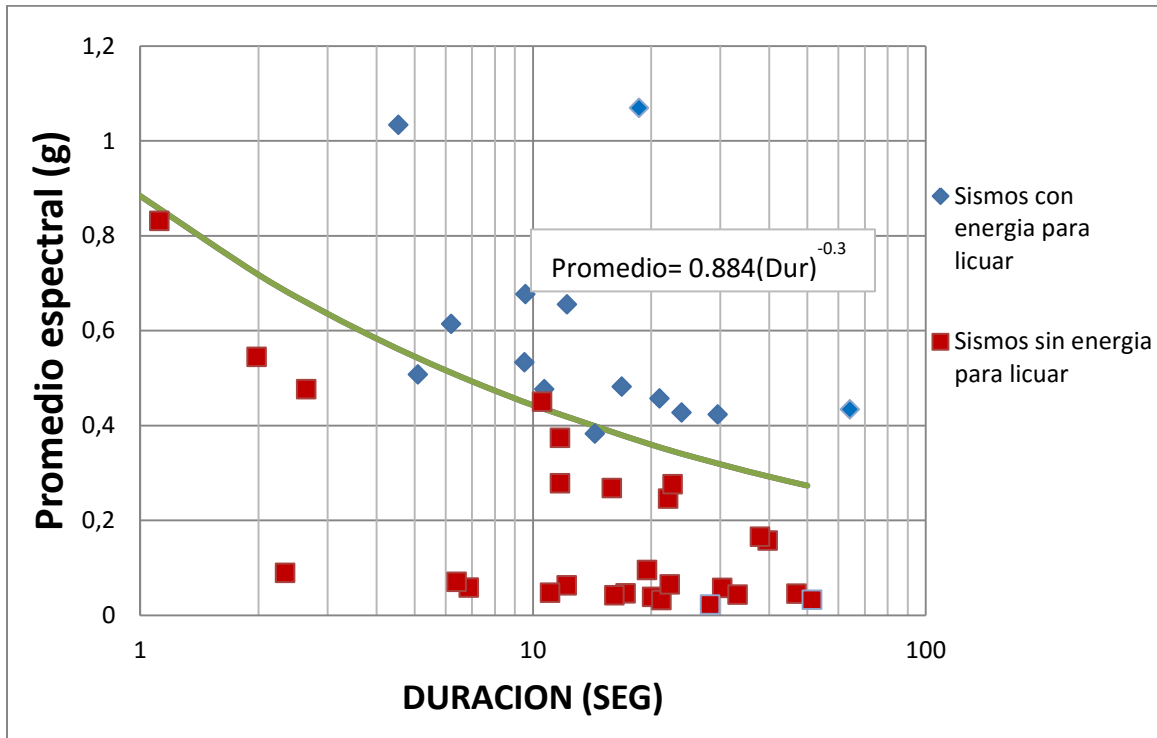


Figura 61 Correlación entre PSA Vs Tiempo de Duración con división de zonas que licuan de las que no licuan

4.5 Resultados con Sismo en Superficie y CSR

Se comparó los tres perfiles con este método, el cual para Treasure Island con un Vs de 240m/s se obtiene un N1,60 de 18 golpes según la correlación $Vs = 89,8 * N_{1(60)}^{0.341}$, para Vs 100m/s un N1,60 de 1 golpe y para Vs 350m/s un N1,60 de 54 golpes. Los valores de CSR_{7,5} para cada perfil se muestran en la Tabla 12, el cual se indican en rojo los sismos que pueden licuar según este método. En la Figura 62 se puede ver los sismos que poseen energía necesaria para licuar comparados con la energía empírica del sismo (CSR), el cual se muestra que para Tresure Island solo 2 sismos no licuan, para un suelo con Vs 100 todos licuan y para Vs 350 ninguno licua, esto se debe a que no está considerando la energía real que posee el sismo.

Tabla 12 Resultados de CSR corregido por Treasure Island

				Vs 240	Vs100	Vs350
a(g)	CSR	M	Factor	CSR 7,5	CSR7,5	CSR7,5
0.22870252	0.31123294	5.30	1.49150672	0.20867016	0.06157643	0.50354888
0.2039609	0.27756298	5.90	1.32383099	0.20966648	0.03544365	0.31845903
0.34917438	0.47517872	5.20	1.52343617	0.31191246	0.05282974	0.43568858
0.38878008	0.52907667	6.06	1.28502158	0.4117259	0.05531298	0.48103501
0.18661058	0.25395155	6.54	1.18058572	0.2151064	0.05731852	0.39772286
0.05703634	0.07761868	6.88	1.11589065	0.06955761	0.03467817	0.06632983
0.16174691	0.22011549	7.00	1.09463911	0.20108498	0.05451864	0.22528122
0.10239524	0.13934596	7.62	0.99606127	0.13989698	0.09026826	0.14182053
0.26867373	0.36562831	6.61	1.16669129	0.31338908	0.03111075	0.67732692
0.3018073	0.41071858	5.34	1.4790883	0.27768361	0.05562054	0.30416024
0.31777668	0.43245073	7.30	1.04473215	0.41393455	0.06121663	0.43920916
0.27262414	0.37100428	7.28	1.04792424	0.35403731	0.03343868	0.35617665
0.17143896	0.23330505	7.35	1.03683216	0.22501718	0.03122313	0.21923487

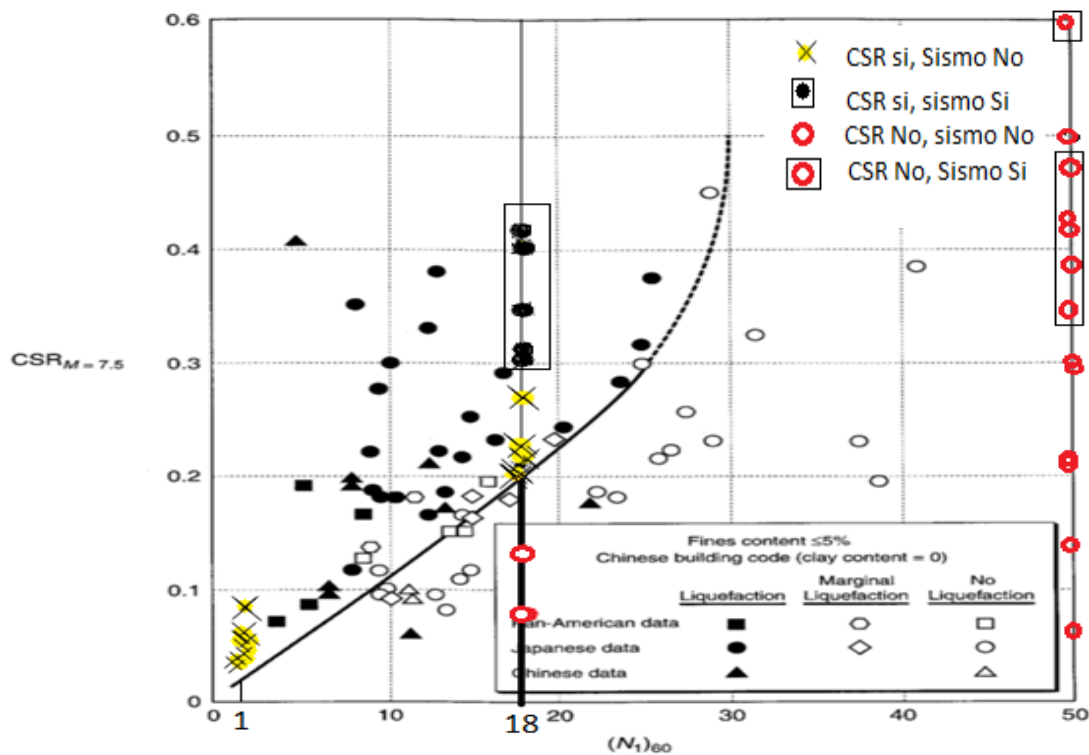


Figura 62 Comparación entre CSR y la energía real del sismo para producir licuación

Conclusiones

El sector fuerte de un sismo es donde las aceleraciones están con mayor fuerza, es decir, es cuando el sismo sacude más el suelo, pues al estudiar este sector se obtendrán intensidades del sismo, que desde el punto de vista de ingeniería civil, nos alerta para realizar prevenciones o reducir algún riesgo producido por el mismo.

La intensidad del sector fuerte es determinada de distintos métodos, algunos con sectores más grandes que otros, por lo que no hay un método definido que precise exactamente este sector, pero se pudo ver que el método de Echezuria es el más robusto para establecer la intensidad.

Al tener un registro de datos de acelerograma y se obtiene la información de ambos sentidos, no se puede tomar directamente la aceleración pico mayor para obtener la intensidad ya que si la relación entre las aceleraciones es menor a 1,5 es posible que estemos descartando el sentido de mayor intensidad.

Se demuestra que en este TEG que no es adecuado un análisis pseudo estático a partir de la aceleración pico y un número de ciclos equivalentes (CSR) para definir la energía requerida para causar licuación en un perfil geotécnico, por cuanto es la respuesta dinámica del perfil la que condiciona esta situación.

Con la comparación del promedio de las aceleraciones espectrales con respecto al tiempo de duración se puede apreciar si existe licuación. Este hallazgo se considera importante porque en él se está relacionando las amplificaciones del suelo, que de manera implícita vincula el periodo fundamental del terreno.

Referencias

- 1- Portal Educativo. (09 de Mayo de 2014). *Portal Educativo*. Recuperado el 06 de Junio de 2018, de www.portaleducativo.net
- 2- Aguilera L.M., B. D. (2006). *Ciencias de la tierra y el universo*. Buenos Aires: Santillana.
- 3- Boiero A, D. G. (2009). *Determinación de Espectros de Respuesta en los Municipios Bolívar, Sotillo, Urbaneja y Guanta*. Caracs, Venezuela: Trabajo especial de grado. Chile, U. d. (s.f.). *Universidad de Chile*.
- 4- Echezuria, H. (2017). *CAMBIOS EN LAS INTENSIDADES DEL SECTOR FUERTE DEL ACELEROGRAMA PARA CUATRO DEFINICIONES DE DURACIÓN*. Caracas.
- 5- Tarbuck, Edward J. F. K. (2005). *Ciencias de la Tierra*. Madrid: Pearson Educación S. A.
- 6- FUNVISIS. (22 de 08 de 2016). *Amenaza Sísmica*. Recuperado el 08 de 06 de 2018, de <http://www.funvisis.gob.ve/old/amenaza.php>
- 7- Echezuría, Heriberto. (2017). *POTENCIAL DE LICUACIÓN UTILIZANDO LA INTENSIDAD DEL SECTOR FUERTE DEL SISMO*. Caracas, Venezuela.
- 8- Hidalgo V, Z. J., & Pereira G, P. M. (2017). *Análisis de Espectros de Respuesta en Suelos*. Caracas, Venezuela: Trabajo especial de grado.
- 9- Kramer, S. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. New Jersey, USA.

- 10- Monroe, J. P. (2008). *Geología, Dinámica y Evolución de la Tierra*. Madrid, España: Paraninfo.
- 11- Sauter, F. (1989). *Introducción a la sismología*. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- 12- Udías, A. M. (2009). *Fundamentos de Geofísica, Argentina*. INPRES. Obtenido de <http://contenidos.inpres.gov.ar/docs/Fallas%20Geol%C3%B3gicas.pdf>
- 13- Universidad de Alicante. (21 de 05 de 2014). *Sismología e ingeniería sísmica*. Recuperado el 09 de 06 de 2018, de <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/19945/5/practica5.pdf>

Apéndice

Apéndice 1. Sismos de Magnitud 5-5.9 obtenidos en roca

Magni	sismo	año	Apico H1	ApicoH2	Numeración
5.3	"Izmir_ Turkey"	1977	408.66	122.04	1
5.2	"Managua_ Nicaragua-02"	1972	257.84	216.66	2
5.34	"Dursunbey_ Turkey"	1979	219.38	281.85	3
5	"Central Calif-02"	1960	22.41	44.45	4
5.14	"Hollister-03"	1974	98.35	137.85	5
5.42	"Livermore-02"	1980	38.06	44.09	6
5.19	"Anza (Horse Canyon)-01"	1980	97.32	120.09	7
5.9	"Westmorland"	1981	151.82	161.92	8
5.01	"Imperial Valley-07"	1979	150.99	80.73	9
5.74	"Coyote Lake"	1979	109.83	103.77	10
5.1	"Borah Peak_ ID-02"	1983	24.64	18.65	11
5.8	"Livermore-01"	1980	127.28	251.21	12
5.3	"Central Calif-01"	1954	47.56	51.76	13
5.2	"Northern Calif-07"	1975	114.32	202.97	14
5.8	"Lazio-Abruzzo_ Italy"	1984	63.21	66.64	15
5.9	"Norcia_ Italy"	1979	23.02	35.58	16
5	"Yountville"	2000	35.58	14.08	17
5.28	"Northridge-06"	1994	23.01	29.35	18
7.2	"Northern Calif-06"	1967	16.51	12.91	19
5.9	"Chi-Chi_ Taiwan-02"	1999	30.83	33.62	20

H1 y H2 corresponden a cada dirección del sismo

Apéndice 2. Sismos de Magnitud 6-6.9 obtenidos en roca

Dist (Km)	Magn	Sismo	año	Apico H1	ApicoH2	Num.
2.07	6	"Helena_ Montana-01"	1935	157.71	153.05	21
3.51	6.24	"Managua_ Nicaragua-01"	1972	364.77	323.26	22
6.07	6.33	"Victoria_ Mexico"	1980	43.87	32.19	23
8.54	6.53	"Imperial Valley-06"	1979	159.52	215.35	24
10.27	6.6	"Corinth_ Greece"	1981	232.27	290.81	25
12.56	6.06	"Mammoth Lakes-01"	1980	422.12	266.18	26
13.34	6.9	"Irpinia_ Italy-01"	1980	124.03	133.78	27
17.64	6.19	"Parkfield"	1966	58.61	62.25	28
23.23	6.19	"Morgan Hill"	1984	79.52	107.74	29
25.88	6.54	"Superstition Hills-02"	1987	103.42	137.12	30
26.72	6.5	"Northern Calif-03"	1954	160.28	199.50	31
28.11	6.36	"Coalinga-01"	1983	257.13	268.69	32
31.69	6.9	"Kobe_ Japan"	1995	290.40	190.53	33
33.32	6.5	"Friuli_ Italy-01"	1976	60.73	89.25	34
34.92	6.19	"Chalfant Valley-02"	1986	41.32	46.83	35
39.52	6.46	"Big Bear-01"	1992	220.98	176.41	36
42.3	6.61	"Tottori_ Japan"	2000	521.52	296.80	37
44.52	6.4	"Northern Calif-01"	1941	112.58	119.34	38
45.12	6.63	"Borrego Mtn"	1968	130.15	56.44	39
47.16	6.6	"Bam_ Iran"	2003	165.26	107.18	40
55.2	6.61	"San Fernando"	1971	25.27	40.73	41
56.88	6.5	"Borrego"	1942	64.67	44.41	42
58.48	6.32	"Taiwan SMART1(40)"	1986	163.10	148.66	43
59.64	6.2	"Chi-Chi_ Taiwan-03"	1999	46.94	43.98	44
61.13	6	"Parkfield-02_ CA"	2004	13.38	10.16	45
63.56	6.63	"Niigata_ Japan"	2004	295.45	348.35	46
65.67	6.7	"Ierissos_ Greece"	1983	29.95	26.18	47
69.51	6.52	"San Simeon_ CA"	2003	23.65	27.59	48
71.7	6.06	"N. Palm Springs"	1986	40.58	36.38	49
73.35	6	"Southern Calif"	1952	35.35	48.76	50
75.64	6.69	"Northridge-01"	1994	49.41	58.27	51
79.59	6.88	"Borah Peak_ ID-01"	1983	28.12	23.68	52
82.76	6.3	"Chi-Chi_ Taiwan-06"	1999	72.70	95.51	53
83.48	6	"Umbria Marche_ Italy"	1997	3.02	3.78	54
85.8	6.4	"Dinar_ Turkey"	1995	15.52	14.52	55
88	6.8	"Chuetsu-oki_ Japan"	2007	43.56	31.65	56
90.53	6.9	"Iwate_ Japan"	2008	64.70	73.99	57
91.15	6.6	"Northwest Calif-02"	1941	61.87	39.64	58
91.34	6.2	"Christchurch_ New Zealand"	2011	18.30	20.28	59
94.89	6.3	"L'Aquila_ Italy"	2009	7.19	6.02	60

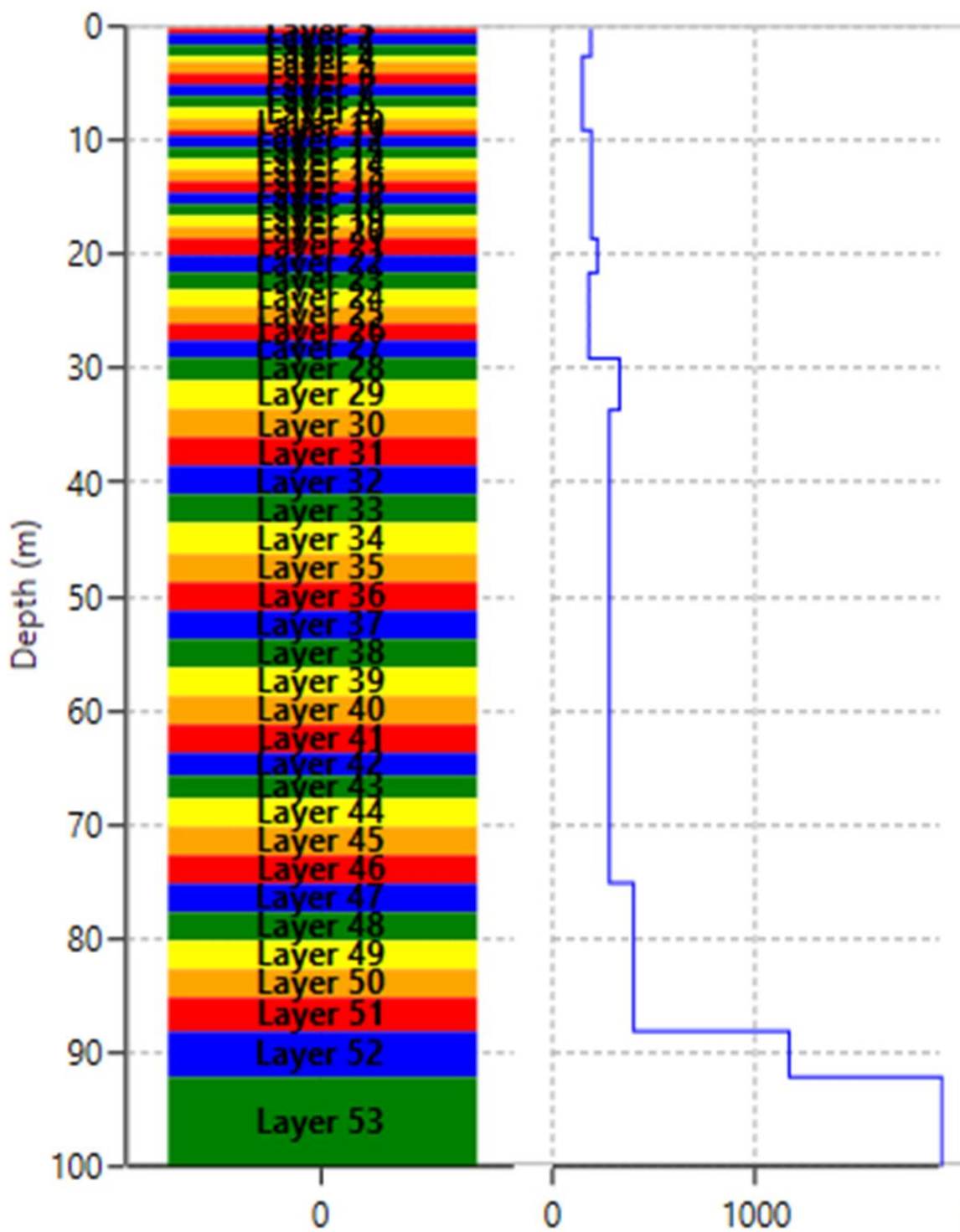
Apéndice 3. Sismos de Magnitud 7-7.9 obtenidos en roca

Dist (Km)	Magn	Sismo	año	Apico H1	ApicoH2	Num.
1.79	7.35	"Tabas_ Iran"	1978	837.76	845.39	61
3.62	7.51	"Kocaeli_ Turkey"	1999	225.80	162.01	62
10.96	7.62	"Chi-Chi_ Taiwan"	1999	283.57	233.42	63
15.97	7.01	"Cape Mendocino"	1992	114.54	111.50	64
19.74	7.28	"Landers"	1992	409.27	278.29	65
23.59	7.1	"Montenegro_ Yugoslavia"	1979	214.23	250.39	66
26.46	7.54	"St Elias_ Alaska"	1979	96.47	172.54	67
30.75	7.2	"El Mayor-Cucapah_ Mexico"	2010	270.14	188.38	68
34.61	7.68	"Sitka_ Alaska"	1972	94.48	84.39	69
38.42	7.36	"Kern County"	1952	155.87	176.86	70
43.29	7.2	"Gulf of Aqaba"	1995	90.96	78.98	71
50.78	7.21	"Caldiran_ Turkey"	1976	62.71	95.63	72
53.02	7.9	"Denali_ Alaska"	2002	54.63	73.22	73
55.82	7.3	"Taiwan SMART1(45)"	1986	116.26	119.46	74
57.37	7	"Darfield_ New Zealand"	2010	46.75	48.21	75
60.43	7.51	"Kocaeli_ Turkey"	1999	99.06	98.25	76
65.88	7.1	"Montenegro_ Yugoslavia"	1979	62.75	77.11	77
69.21	7.28	"Landers"	1992	112.79	143.34	78
72.44	7.2	"El Mayor-Cucapah_ Mexico"	2010	191.72	69.91	79
77.06	7.62	"Chi-Chi_ Taiwan"	1999	66.59	52.25	80
80	7.54	"St Elias_ Alaska"	1979	81.82	64.08	81
82.2	7.62	"Chi-Chi_ Taiwan"	1999	43.58	31.47	82
89.76	7.35	"Tabas_ Iran"	1978	91.33	102.86	83
93.7	7	"Darfield_ New Zealand"	2010	67.62	74.46	84
97.09	7.2	"El Mayor-Cucapah_ Mexico"	2010	25.41	33.99	85
103.14	7.1	"Montenegro_ Yugoslavia"	1979	33.66	41.51	86
110.23	7	"Darfield_ New Zealand"	2010	37.55	24.89	87
114.62	7.36	"Kern County"	1952	41.43	57.91	88
118.4	7.2	"El Mayor-Cucapah_ Mexico"	2010	22.60	18.52	89
119.77	7.35	"Tabas_ Iran"	1978	89.01	65.60	90
122.65	7.36	"Kern County"	1952	47.07	52.18	91
126.03	7.51	"Kocaeli_ Turkey"	1999	97.00	85.43	92
135	7.62	"Chi-Chi_ Taiwan"	1999	17.45	25.15	93
137.25	7.28	"Landers"	1992	27.98	27.17	94
139.11	7.9	"Denali_ Alaska"	2002	100.57	63.07	95
141.37	7.51	"Kocaeli_ Turkey"	1999	99.66	85.58	96
146.89	7.28	"Landers"	1992	69.18	60.62	97
150.33	7.35	"Tabas_ Iran"	1978	26.86	26.34	98
158.77	7	"Darfield_ New Zealand"	2010	5.63	4.43	99
161.62	7.62	"Chi-Chi_ Taiwan"	1999	22.50	22.28	100
164.66	7.9	"Denali_ Alaska"	2002	37.38	33.55	101
165	7.2	"El Mayor-Cucapah_ Mexico"	2010	47.28	40.53	102
175.65	7.28	"Landers"	1992	64.58	41.73	103
180.24	7.51	"Kocaeli_ Turkey"	1999	11.17	17.44	104
188.19	7	"Darfield_ New Zealand"	2010	17.00	16.53	105
190.05	7.28	"Landers"	1992	17.68	13.52	106
193.91	7.35	"Tabas_ Iran"	1978	31.72	35.47	107

Apéndice 4. Detalles del Perfil Treasure Island

Layer Number	Layer Name	Thickness (m)	Unit Weight (KN/m ³)	Shear Wave Velocity (m/s)	Soil Model	Dmin (%)	Ref. Strain (%)	Reference Stress	β
1	Layer 1	0.5	18.8	175	MKZ	3	0.127	0.3	1.34
2	Layer 2	1	18.8	175	MKZ	3	0.127	0.3	1.34
3	Layer 3	1	18.8	175	MKZ	3	0.127	0.3	1.34
4	Layer 4	0.5	18.8	134	MKZ	3	0.127	0.3	1.34
5	Layer 5	1	18.8	134	MKZ	3	0.127	0.3	1.34
6	Layer 6	1	18.8	134	MKZ	3	0.127	0.3	1.34
7	Layer 7	1	18.8	134	MKZ	3	0.127	0.3	1.34
8	Layer 8	1	18.8	134	MKZ	3	0.127	0.3	1.34
9	Layer 9	1	18.8	134	MKZ	3	0.127	0.3	1.34
10	Layer 10	1	18.8	134	MKZ	3	0.127	0.3	1.34
11	Layer 11	0.5	18.8	178	MKZ	3	0.127	0.3	1.34
12	Layer 12	1	18.8	178	MKZ	3	0.127	0.3	1.34
13	Layer 13	1	18.8	178	MKZ	3	0.127	0.3	1.34
14	Layer 14	1	18.8	178	MKZ	3	0.127	0.3	1.34
15	Layer 15	1	18.8	178	MKZ	3	0.127	0.3	1.34
16	Layer 16	1	17.3	178	MKZ	3	0.196	0.3	0.6
17	Layer 17	1	17.3	178	MKZ	3	0.196	0.3	0.6
18	Layer 18	1	17.3	178	MKZ	3	0.196	0.3	0.6
19	Layer 19	1	17.3	178	MKZ	3	0.196	0.3	0.6
20	Layer 20	1	17.3	178	MKZ	3	0.196	0.3	0.6
21	Layer 21	1.5	17.3	207	MKZ	3	0.196	0.3	0.6
22	Layer 22	1.5	17.3	207	MKZ	3	0.196	0.3	0.6
23	Layer 23	1.5	17.3	165	MKZ	3	0.196	0.3	0.6
24	Layer 24	1.5	17.3	165	MKZ	3	0.196	0.3	0.6
25	Layer 25	1.5	17.3	165	MKZ	3	0.196	0.3	0.6
26	Layer 26	1.5	17.3	165	MKZ	3	0.196	0.3	0.6
27	Layer 27	1.5	17.3	165	MKZ	3	0.196	0.3	0.6
28	Layer 28	2	17.9	317	MKZ	3	0.196	0.3	0.6
29	Layer 29	2.5	17.9	317	MKZ	3	0.196	0.3	0.6
30	Layer 30	2.5	20.1	267	MKZ	3	0.196	0.3	0.6
31	Layer 31	2.5	20.1	267	MKZ	3	0.196	0.3	0.6
32	Layer 32	2.5	20.1	267	MKZ	3	0.196	0.3	0.6
33	Layer 33	2.5	20.1	267	MKZ	3	0.196	0.3	0.6
34	Layer 34	2.5	20.1	267	MKZ	3	0.196	0.3	0.6
35	Layer 35	2.5	20.1	267	MKZ	3	0.196	0.3	0.6
36	Layer 36	2.5	20.1	267	MKZ	3	0.196	0.3	0.6
37	Layer 37	2.5	20.1	267	MKZ	3	0.196	0.3	0.6
38	Layer 38	2.5	20.1	267	MKZ	3	0.196	0.3	0.6
39	Layer 39	2.5	20.1	267	MKZ	3	0.196	0.3	0.6
40	Layer 40	2.5	20.1	267	MKZ	3	0.196	0.3	0.6
41	Layer 41	2.5	20.1	267	MKZ	3	0.196	0.3	0.6
42	Layer 42	2	18.1	267	MKZ	3	0.196	0.3	0.6
43	Layer 43	2	18.1	267	MKZ	3	0.196	0.3	0.6
44	Layer 44	2.5	18.1	267	MKZ	3	0.196	0.3	0.6
45	Layer 45	2.5	18.1	267	MKZ	3	0.196	0.3	0.6
46	Layer 46	2.5	18.1	267	MKZ	3	0.196	0.3	0.6
47	Layer 47	2.5	18.7	386	MKZ	3	0.196	0.3	0.6
48	Layer 48	2.5	18.7	386	MKZ	3	0.196	0.3	0.6
49	Layer 49	2.5	18.7	386	MKZ	3	0.196	0.3	0.6
50	Layer 50	2.5	18.7	386	MKZ	3	0.196	0.3	0.6
51	Layer 51	3	18.7	386	MKZ	3	0.196	0.3	0.6
52	Layer 52	4	19.6	1150	MKZ	3	0.196	0.3	0.6
53	Layer 53	8	19.6	1900	MKZ	3	0.196	0.3	0.6

Apéndice 5. Velocidad de corte en perfil Treasure island



Apéndice 6. Valores de Intensidad en roca con Met. Echezuera. Mag 5-5.9

HE H1					HE H2					Num.
To	Tf	Tsm	Asm2	lsm cm2/s3	To	Tf	Tsm	Asm2	lsm cm2/s3	
0.21	2.12	1.91	0.5119	9777.66	0.25	2.88	2.63	0.1501	3946.32	1
0.73	14.28	13.55	0.1941	26294.87	0.08	24.52	24.44	0.0890	21764.70	2
0.25	4.85	4.60	0.2552	11738.56	0.25	6.33	6.08	0.2233	13576.82	3
0.76	54.12	53.37	0.0017	920.49	0.92	36.99	36.07	0.0054	1943.44	4
1.99	6.32	4.33	0.0415	1795.04	1.74	5.81	4.07	0.0665	2708.09	5
2.93	9.86	6.93	0.0098	678.16	2.87	12.91	10.04	0.0110	1102.46	6
2.01	4.53	2.52	0.0591	1485.58	1.98	4.69	2.71	0.0752	2037.60	7
3.13	15.25	12.12	0.1322	16012.21	3.02	14.62	11.60	0.0966	11196.49	8
3.66	5.38	1.72	0.2367	4071.55	3.64	7.81	4.17	0.0261	1087.82	9
4.66	9.89	5.23	0.0921	4817.69	4.27	19.67	15.40	0.0360	5536.55	10
3.58	16.52	12.94	0.0019	240.59	2.85	11.12	8.27	0.0015	124.31	11
2.84	11.11	8.27	0.0631	5215.48	1.33	14.63	13.31	0.0980	13038.05	12
1.79	25.14	23.36	0.0115	2677.65	1.67	28.84	27.17	0.0101	2739.51	13
3.96	9.58	5.62	0.0883	4957.50	4.20	7.54	3.35	0.2073	6934.74	14
0.70	16.60	15.90	0.0138	2192.03	0.63	20.91	20.28	0.0108	2187.26	15
0.53	21.02	20.49	0.0031	635.24	5.76	19.31	13.55	0.0058	780.10	16
5.84	20.54	14.70	0.0055	809.90	8.81	27.98	19.17	0.0009	174.29	17
1.40	13.06	11.66	0.0025	291.69	1.54	11.82	10.28	0.0028	290.13	18
1.62	24.94	23.32	0.0017	390.21	1.60	23.84	22.24	0.0012	274.93	19
15.17	29.49	14.32	0.0073	1041.33	13.15	30.13	16.98	0.0062	1045.88	20

Apéndice 7. Valores de Intensidad en roca con Met. Bolt. Mag 5-5.9

Bolt H1					Bolt H2					Num.
To	Tf	Tsm	Asm2	lsm cm2/s3	To	Tf	Tsm	Asm2	lsm cm2/s3	
0.28	1.36	1.08	0.358	3867.08	0.06	3.44	3.38	0.118	3972.05	1
0.70	40.42	39.72	0.067	26798.76	0.57	33.38	32.81	0.067	21844.42	2
0.16	6.52	6.36	0.187	11886.56	0.14	9.50	9.36	0.214	19989.26	3
0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	4
0.31	9.21	8.91	0.024	2137.53	0.30	10.49	10.19	0.029	2904.43	5
0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	6
0.29	18.05	17.76	0.020	3514.61	0.35	7.63	7.28	0.029	2121.33	7
1.51	24.11	22.60	0.204	18140.01	0.77	26.61	25.84	0.045	11667.05	8
2.35	10.52	8.17	0.053	4353.33	1.73	10.40	8.68	0.015	1279.70	9
0.42	26.67	26.25	0.027	7191.13	0.64	25.97	25.33	0.024	6089.27	10
0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	11
0.74	23.97	23.23	0.026	6034.71	0.91	26.32	25.41	0.053	13357.39	12
0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	1.77	37.99	36.23	0.008	2783.61	13
0.47	13.38	12.91	0.043	5495.18	0.48	13.00	12.53	0.060	7516.11	14
0.69	29.48	28.79	0.008	2429.17	0.89	28.21	27.33	0.008	2273.97	15
0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	16
0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	17
0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	18
0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	19
0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	20

Apéndice 8. Valores de Intensidad en roca con Met. MCann. Mag 5-5.9

MC H1					MC H2					Num.
To	Tf	Tsm	Asm2	lsm cm2/s3	To	Tf	Tsm	Asm2	lsm cm2/s3	
0.23	4.47	4.24	0.508	21554.54	0.30	2.81	2.51	0.155	3898.14	1
0.71	13.81	13.11	0.201	26281.36	0.06	24.39	24.33	0.089	21763.70	2
0.38	5.12	4.74	0.248	11739.24	0.29	6.12	5.83	0.233	13571.02	3
0.71	54.25	53.54	0.002	920.63	0.96	37.06	36.11	0.005	1943.06	4
2.06	6.13	4.07	0.043	1746.69	1.26	6.14	4.88	0.057	2800.22	5
3.02	9.80	6.78	0.010	675.45	2.70	9.80	7.10	0.015	1037.90	6
1.79	4.91	3.12	0.048	1505.08	1.89	4.71	2.82	0.073	2052.88	7
3.00	14.83	11.84	0.136	16043.18	2.85	14.29	11.45	0.098	11209.34	8
4.02	5.27	1.25	0.096	1196.16	3.56	7.78	4.22	0.026	1085.81	9
4.29	9.68	5.39	0.096	5156.30	3.85	19.50	15.66	0.036	5611.79	10
3.51	16.41	12.90	0.002	240.73	2.56	10.78	8.22	0.002	123.63	11
2.56	11.07	8.52	0.061	5235.85	1.21	14.43	13.22	0.099	13035.07	12
1.93	25.44	23.51	0.011	2652.27	1.57	28.40	26.83	0.010	2734.89	13
3.83	9.50	5.67	0.088	4976.02	3.79	7.82	4.03	0.175	7067.72	14
0.59	16.39	15.80	0.014	2181.11	0.50	23.16	22.67	0.010	2213.03	15
0.37	20.60	20.24	0.003	630.39	5.58	18.99	13.40	0.006	774.29	16
5.70	21.52	15.82	0.006	893.79	7.56	29.00	21.44	0.001	179.60	17
0.94	14.44	13.50	0.002	307.23	1.10	11.52	10.42	0.003	289.90	18
1.38	26.23	24.85	0.002	394.41	1.38	21.06	19.69	0.001	258.39	19
13.27	26.77	13.50	0.007	995.47	11.17	34.98	23.81	0.005	1081.69	20

Apéndice 9. Valores de Intensidad en roca con Met. Echezuera. Mag 6-6.9

HE H1					HE H2					Num.
To	Tf	Tsm	Asm2	lsm cm2/s3	To	Tf	Tsm	Asm2	lsm cm2/s3	
1.61	3.46	1.85	0.2144	3966.65	1.72	3.7	1.98	0.2872	5686.56	21
1.745	11.425	9.68	0.9339	90401.98	2.33	8.73	6.4	1.7825	114082.28	22
3.75	16.48	12.73	0.0153	1950.11	1.62	12.88	11.26	0.0121	1365.17	23
5.86	8.49	2.63	0.4304	11320.55	6.5	10.34	3.84	0.5505	21139.80	24
3.89	10.81	6.92	0.4898	33893.83	3.66	9.06	5.4	0.7313	39489.15	25
3.93	14.22	10.29	0.6944	71457.64	3.45	12.595	9.145	0.4401	40250.14	26
3.6744	17.4912	13.8168	0.1794	24782.61	4.9968	17.5008	12.504	0.2623	32799.38	27
2.11	7.63	5.52	0.0305	1683.55	2.15	9.35	7.2	0.0247	1780.95	28
4.115	9.32	5.205	0.0630	3281.08	4.935	9.69	4.755	0.1064	5060.14	29
5.48	17.92	12.44	0.0820	10206.94	5.57	18.73	13.16	0.1562	20555.03	30
6.27	9.06	2.79	0.7197	20079.09	6.65	8.88	2.23	0.6217	13864.40	31
7.16	13.33	6.17	1.3351	82374.61	7.5	14.64	7.14	0.6301	44986.18	32
16.97	24.33	7.36	0.9157	67392.59	16.07	26.28	10.21	0.2964	30257.49	33
7.36	16.485	9.125	0.0620	5656.15	5.64	14.085	8.445	0.0616	5200.45	34
4.08	9.135	5.055	0.0184	931.13	5.165	12.025	6.86	0.0242	1662.11	35
7.16	16.16	9	0.3784	34059.41	7.16	16.16	9	0.3430	30870.21	36
24.08	30.23	6.15	2.0132	123811.20	23.74	35.18	11.44	0.5077	58082.86	37
6.165	9.86	3.695	0.1261	4658.56	6.525	9.48	2.955	0.1351	3990.81	38
7.12	10.38	3.26	0.2047	6672.08	6.83	21.57	14.74	0.0328	4833.58	39
23.52	28.315	4.795	0.2437	11684.42	22.885	28.685	5.8	0.1535	8900.65	40
1.45	10.42	8.97	0.0081	723.51	1.93	9.645	7.715	0.0120	925.33	41
1.805	9.815	8.01	0.0330	2644.30	1.7	17.365	15.665	0.0163	2546.93	42
4.76	7.93	3.17	0.3974	12598.44	4.28	12.08	7.8	0.1186	9249.58	43
29.552	43.452	13.9	0.0252	3507.33	30.176	56.108	25.932	0.0159	4122.79	44
18.87	24.155	5.285	0.0015	80.87	19.58	26.46	6.88	0.0011	77.69	45
25.96	27.55	1.59	1.6297	25912.43	25.68	27.48	1.8	1.5434	27781.89	46
7.2024	11.8992	4.6968	0.0092	430.66	7.812	12.1632	4.3512	0.0069	300.75	47
17.05	21.235	4.185	0.0065	272.90	16.83	19.915	3.085	0.0138	424.43	48
10.045	15.72	5.675	0.0139	787.18	9.7	12.92	3.22	0.0140	449.52	49
1.37	3.735	2.365	0.0260	614.64	1.15	3.99	2.84	0.0315	894.61	50
9	11.7	2.7	0.0380	1027.08	8.68	11.94	3.26	0.0436	1421.18	51
10.18	17.16	6.98	0.0079	549.50	8.54	10.76	2.22	0.0176	391.59	52
31.62	33.98	2.36	0.0707	1667.90	30.272	41.072	10.8	0.0515	5560.38	53
26.87	32.395	5.525	0.0002	13.70	31.895	37.58	5.685	0.0002	13.34	54
25.194	42.8103	17.6163	0.0027	481.28	25.194	42.8103	17.6163	0.0026	457.38	55
26.705	36.46	9.755	0.0141	1372.65	26.065	33.15	7.085	0.0121	859.00	56
34.48	40.4	5.92	0.0307	1819.40	32.85	38.67	5.82	0.0457	2660.03	57
2.745	8.965	6.22	0.0285	1772.72	0.95	6.355	5.405	0.0199	1075.03	58
9.81	13.59	3.78	0.0054	205.09	9.87	13.31	3.44	0.0069	235.86	59
19.785	27.07	7.285	0.0006	41.15	20.525	23.62	3.095	0.0007	20.30	60

Apéndice 10. Valores de Intensidad en roca con Met. Bolt. Mag 6-6.9

Bolt H1					Bolt H2					Num.
To	Tf	Tsm	Asm2	lsm cm2/s3	To	Tf	Tsm	Asm2	lsm cm2/s3	
1.63	3.36	1.73	0.2246	3885.80	1.74	3.29	1.55	0.3528	5467.98	21
1.31	14.415	13.105	0.7257	95100.26	1.34	14.455	13.115	0.9369	122873.85	22
0	0	0	0.0000	0.00	0	0	0	0.0000	0.00	23
5.86	17.485	11.625	0.1462	16994.59	6.055	17.61	11.555	0.2197	25390.48	24
3.31	20.54	17.23	0.2395	41257.78	3.59	16.79	13.2	0.3714	49029.16	25
1.79	15.995	14.205	0.5699	80949.27	1.76	14.91	13.15	0.3309	43515.82	26
3.6672	26.484	22.8168	0.1424	32489.13	3.3408	29.784	26.4432	0.1833	48478.22	27
5.24	7.31	2.07	0.0425	879.45	5.48	6.05	0.57	0.0798	454.77	28
6.31	8.85	2.54	0.0928	2356.32	6.47	9.63	3.16	0.1389	4389.43	29
5.55	17.84	12.29	0.0825	10142.32	5.37	18.63	13.26	0.1556	20631.59	30
6.035	16.805	10.77	0.2697	29043.00	6.13	14.655	8.525	0.2304	19642.56	31
7.01	19.26	12.25	0.7378	90382.15	4.73	22.39	17.66	0.2983	52685.67	32
15.16	34.29	19.13	0.4278	81839.26	12.55	30	17.45	0.2011	35095.15	33
5.2	16.33	11.13	0.0574	6393.15	5.715	13.595	7.88	0.0611	4813.89	34
0	0	0	0.0000	0.00	0	0	0	0.0000	0.00	35
6.42	15.8	9.38	0.3675	34466.81	5.36	16.08	10.72	0.3184	34136.26	36
17.1	43.77	26.67	0.6902	184074.02	17.56	41.36	23.8	0.3079	73287.75	37
6.355	8.985	2.63	0.1481	3896.19	6.73	9.405	2.675	0.1419	3795.55	38
7.16	10.22	3.06	0.2137	6540.61	15.02	15.09	0.07	0.0007	0.46	39
17.79	35.465	17.675	0.1057	18684.48	22.685	34.15	11.465	0.1082	12410.81	40
0	0	0	0.0000	0.00	0	0	0	0.0000	0.00	41
2.72	4.865	2.145	0.0556	1192.22	0	0	0	0.0000	0.00	42
4.6	7.91	3.31	0.4193	13879.50	4.5	11.95	7.45	0.1207	8995.36	43
0	0	0	0.0000	0.00	0	0	0	0.0000	0.00	44
0	0	0	0.0000	0.00	0	0	0	0.0000	0.00	45
24.49	30.92	6.43	0.5909	37993.64	24.57	34.77	10.2	0.3870	39473.02	46
0	0	0	0.0000	0.00	0	0	0	0.0000	0.00	47
0	0	0	0.0000	0.00	0	0	0	0.0000	0.00	48
0	0	0	0.0000	0.00	0	0	0	0.0000	0.00	49
0	0	0	0.0000	0.00	0	0	0	0.0000	0.00	50
0	0	0	0.0000	0.00	10.98	11.14	0.16	0.2063	330.10	51
0	0	0	0.0000	0.00	0	0	0	0.0000	0.00	52
31.248	32.428	1.18	0.1076	1269.79	30.952	33.472	2.52	0.1222	3079.74	53
0	0	0	0.0000	0.00	0	0	0	0.0000	0.00	54
0	0	0	0.0000	0.00	0	0	0	0.0000	0.00	55
0	0	0	0.0000	0.00	0	0	0	0.0000	0.00	56
36.29	36.41	0.12	0.2386	286.36	35.7	36.69	0.99	0.0933	923.48	57
5.44	5.495	0.055	0.0017	0.93	0	0	0	0.0000	0.00	58
0	0	0	0.0000	0.00	0	0	0	0.0000	0.00	59
0	0	0	0.0000	0.00	0	0	0	0.0000	0.00	60

Apéndice 11. Valores de Intensidad en roca con Met. MCann. Mag 6-6.9

MC H1					MC H2					Num.
To	Tf	Tsm	Asm2	lsm cm2/s3	To	Tf	Tsm	Asm2	lsm cm2/s3	
1.63	3.36	1.73	0.2246	3885.80	1.74	3.68	1.94	0.2910	5645.90	21
1.725	11.425	9.7	0.9314	90348.77	2.3	8.635	6.335	1.7950	113713.54	22
2.46	16.51	14.05	0.0121	1700.32	1.67	12.96	11.29	0.0119	1347.34	23
5.875	8.455	2.58	0.4335	11184.00	6.485	10.415	3.93	0.5390	21184.65	24
3.95	10.83	6.88	0.4894	33670.88	3.67	8.71	5.04	0.7415	37373.43	25
3.83	14.275	10.445	0.6953	72623.79	3.485	12.58	9.095	0.4365	39695.71	26
3.6648	17.4192	13.7544	0.1792	24654.16	4.956	17.5272	12.5712	0.2623	32968.43	27
2.35	7.6	5.25	0.0308	1616.37	2.19	9.4	7.21	0.0247	1782.70	28
4.185	9.295	5.11	0.0643	3283.27	4.915	9.655	4.74	0.1068	5061.85	29
5.97	17.9	11.93	0.0795	9485.60	5.67	18.77	13.1	0.1541	20190.16	30
6.235	9.2	2.965	0.6923	20526.08	6.68	8.905	2.225	0.6025	13405.20	31
7.13	13.3	6.17	1.3451	82991.23	7.64	14.62	6.98	0.6335	44215.11	32
16.94	24.17	7.23	0.9352	67616.92	16.24	26.19	9.95	0.2982	29669.14	33
7.54	16.415	8.875	0.0631	5596.22	5.725	14.18	8.455	0.0600	5073.45	34
4.12	9.735	5.615	0.0170	955.53	5.175	12.125	6.95	0.0241	1678.27	35
7.2	16.14	8.94	0.3766	33664.62	6.38	14.72	8.34	0.3808	31759.03	36
23.78	29.06	5.28	2.4787	130876.45	23.54	34.94	11.4	0.5137	58558.84	37
6.335	9.81	3.475	0.1281	4452.25	6.51	9.435	2.925	0.1370	4006.12	38
7.18	10.27	3.09	0.2110	6521.40	7.41	20.84	13.43	0.0329	4423.66	39
23.525	28.145	4.62	0.2482	11468.87	23.025	28.815	5.79	0.1550	8977.28	40
1.425	10.39	8.965	0.0081	722.50	3.005	9.455	6.45	0.0126	814.32	41
1.8	9.745	7.945	0.0333	2644.67	1.74	18.67	16.93	0.0161	2718.85	42
4.81	7.95	3.14	0.3799	11927.78	4.5	12.05	7.55	0.1202	9072.90	43
29.48	41.376	11.896	0.0251	2988.98	30.076	56.28	26.204	0.0159	4165.06	44
20.775	23.15	2.375	0.0022	51.90	19.435	26.76	7.325	0.0011	80.85	45
25.77	27.11	1.34	1.7391	23303.62	25.78	27.46	1.68	1.6215	27240.84	46
7.2336	11.892	4.6584	0.0092	429.49	7.7808	11.9712	4.1904	0.0072	301.62	47
17.31	21.265	3.955	0.0066	259.32	17.855	19.885	2.03	0.0184	374.18	48
10.12	15.7	5.58	0.0139	777.31	9.76	12.93	3.17	0.0138	436.56	49
1.385	3.345	1.96	0.0293	574.29	1.13	4.04	2.91	0.0311	904.19	50
9.06	11.68	2.62	0.0391	1023.70	8.74	12.04	3.3	0.0432	1426.15	51
10.2	17.04	6.84	0.0076	520.95	9.14	10.66	1.52	0.0191	290.95	52
31.68	33.924	2.244	0.0667	1495.73	30.824	40.964	10.14	0.0534	5415.36	53
27.075	31.485	4.41	0.0003	11.68	31.955	37.61	5.655	0.0002	13.03	54
25.1433	43.0053	17.862	0.0028	493.84	25.9077	46.8624	20.9547	0.0026	543.49	55
26.75	36.67	9.92	0.0139	1382.74	26.445	33.61	7.165	0.0120	859.77	56
35.81	39.28	3.47	0.0297	1029.23	33.77	38.59	4.82	0.0504	2426.88	57
2.735	8.92	6.185	0.0288	1781.68	1.71	5.755	4.045	0.0235	950.28	58
10.59	13.53	2.94	0.0061	180.07	10.005	12.85	2.845	0.0076	216.20	59
20.42	25.09	4.67	0.0006	28.00	20.42	23.565	3.145	0.0006	20.19	60

Apéndice 12. Valores de Intensidad en roca con Met. Echezueria. Mag 7-7.9

HE H1					HE H2					Num.
To	Tf	Tsm	Arsm2	lsm cm2/s3	To	Tf	Tsm	Arsm2	lsm cm2/s3	
9.96	13.8	3.84	11.2463	431856.31	10.06	15.82	5.76	8.83052224	508638.08	61
2.93	10.445	7.515	0.4654	34976.34	2.54	11.26	8.72	0.31469321	27441.25	62
34.27	39.46	5.19	0.5964	30953.60	34.255	39.445	5.19	0.67088639	34819.00	63
5.38	17.38	12	0.1057	12681.67	5.48	17.48	12	0.09875255	11850.31	64
12.3162	15.6273	3.3111	2.8489	94330.21	12.3708	15.9042	3.5334	1.3013648	45982.42	65
11.26	14.23	2.97	0.9652	28667.65	11.27	14.24	2.97	0.52316245	15537.92	66
3.775	17.845	14.07	0.1140	16040.05	3.92	16.57	12.65	0.35737081	45207.41	67
27.2	34.925	7.725	0.7724	59669.75	30.01	39.835	9.825	0.33251341	32669.44	68
1.745	15.165	13.42	0.0434	5820.01	2.375	17.595	15.22	0.05093566	7752.41	69
3.72	14.7	10.98	0.2316	25428.27	3.24	15.74	12.5	0.23667777	29584.72	70
10.92	28.24	17.32	0.0728	12615.11	18.775	31.805	13.03	0.06369078	8298.91	71
6.59	11.47	4.88	0.0418	2038.23	6.17	12.98	6.81	0.05439501	3704.30	72
31.025	66.855	35.83	0.0232	8319.19	35.67	73.305	37.635	0.02262437	8514.68	73
14.29	28.62	14.33	0.1563	22404.81	11.8	23.48	11.68	0.22664843	26472.54	74
33.3	51.775	18.475	0.0081	1505.51	33.545	47.915	14.37	0.01706688	2452.51	75
22.275	43.745	21.47	0.0648	13918.83	19.1	57.94	38.84	0.07319	28427.00	76
5.67	9	3.33	0.0517	1721.55	5.32	8.8	3.48	0.05973643	2078.83	77
12.26	34.7	22.44	0.1308	29349.94	12.16	33.06	20.9	0.18615071	38905.50	78
32.525	40.27	7.745	0.2289	17727.62	33.115	40.545	7.43	0.0734891	5460.24	79
36.045	47.27	11.225	0.0463	5196.78	35.3	48.14	12.84	0.03244098	4165.42	80
20.145	31.34	11.195	0.0720	8065.78	18.97	42.775	23.805	0.05227969	12445.18	81
34.264	71.944	37.68	0.0168	6330.16	30.832	61.8	30.968	0.01204982	3731.59	82
19.68	34.58	14.9	0.0585	8714.27	22.34	35.84	13.5	0.06267757	8461.47	83
30.68	45.815	15.135	0.0429	6495.80	31.38	51.255	19.875	0.05580344	11090.93	84
25.2	49.815	24.615	0.0035	849.24	37.245	49.68	12.435	0.00693468	862.33	85
2.54	12.76	10.22	0.0109	1117.83	2.82	12.84	10.02	0.01107701	1109.92	86
27.04	41.97	14.93	0.0109	1629.11	27.66	49.285	21.625	0.00513977	1111.48	87
9.63	28.26	18.63	0.0236	4401.38	9.5	31.455	21.955	0.02270848	4985.65	88
37.3	73.765	36.465	0.0050	1814.71	40.04	72.635	32.595	0.00349905	1140.52	89
15.82	32.24	16.42	0.0443	7272.82	17.96	32.08	14.12	0.04367004	6166.21	90
14.65	39.96	25.31	0.0136	3446.86	13.62	30.16	16.54	0.03372937	5578.84	91
25.005	29.075	4.07	0.0936	3810.43	25.74	34.325	8.585	0.04672746	4011.55	92
32.325	70.325	38	0.0034	1295.46	30.04	64.73	34.69	0.00716549	2485.71	93
5.065	36.59	31.525	0.0076	2387.29	3.685	35.215	31.53	0.00822922	2594.67	94
19.57	25.24	5.67	0.1245	7060.79	17.62	32.195	14.575	0.04081708	5949.09	95
1.065	5.235	4.17	0.1637	6825.33	1.145	5.62	4.475	0.12257379	5485.18	96
17.035	40.28	23.245	0.0420	9755.64	23.8	42.495	18.695	0.03145334	5880.20	97
9.72	36.8	27.08	0.0046	1241.11	19.24	36.46	17.22	0.00357694	615.95	98
30.72	63.555	32.835	0.0002	67.59	30.845	82.075	51.23	0.00022993	117.79	99
14.09	82.14	68.05	0.0003	206.71	22.89	72.3	49.41	0.00041644	205.76	100
25.51	73.16	47.65	0.0011	523.75	28.815	75.69	46.875	0.00069022	323.54	101
43.895	66.755	22.86	0.0008	182.85	43.89	66.75	22.86	0.00072252	165.17	102
6.7	34.82	28.12	0.0023	646.35	2.54	42.74	40.2	0.00107459	431.99	103
51.95	94.27	42.32	0.0001	54.88	48.4	95.85	47.45	0.00012863	61.03	104
25.675	63.485	37.81	0.0001	37.04	21.995	61.605	39.61	9.9194E-05	39.29	105
6.52	31.615	25.095	0.0003	64.76	8.14	38.77	30.63	0.00012726	38.98	106
1.68	28.22	26.54	11.91	315.98	1.3	27.64	26.34	0.00159993	421.42	107

Apéndice 14. Valores de Intensidad en roca con Met. MCann. Mag 7-7.9

MC H1					MC H2					Num.
To	Tf	Tsm	Asm2	lsm cm2/s3	To	Tf	Tsm	Asm2	lsm cm2/s3	
10.3	13.8	3.5	11.1652739	390784.58	10.24	15.86	5.62	8.48721683	476981.59	61
2.915	10.435	7.52	0.46876212	35250.91	2.57	12.45	9.88	0.29480887	29127.12	62
34.355	40.22	5.865	0.52769934	30949.57	35.46	52.215	16.755	0.24788533	41533.19	63
5.7	17.84	12.14	0.09263318	11245.67	5.34	12.48	7.14	0.14016239	10007.59	64
13.806	17.9283	4.1223	1.94187722	80050.00	12.4878	19.7847	7.2969	0.8134846	59359.16	65
11.39	20.04	8.65	0.43916443	37987.72	11.37	21.89	10.52	0.23734082	24968.25	66
3.89	18.065	14.175	0.11104201	15740.20	8.515	20.725	12.21	0.34235162	41801.13	67
28.845	41.66	12.815	0.57930744	74238.25	33.675	46.75	13.075	0.29176767	38148.62	68
1.885	15.46	13.575	0.04215584	5722.66	2.49	15.915	13.425	0.05500528	7384.46	69
3.76	14.74	10.98	0.22738315	24966.67	3.39	15.87	12.48	0.23704237	29582.89	70
10.995	28.205	17.21	0.07289606	12545.41	19.35	31.835	12.485	0.06164299	7696.13	71
6.7	11.62	4.92	0.04050835	1993.01	6.2	13.18	6.98	0.05425925	3787.30	72
30.93	66.44	35.51	0.02346233	8331.47	35.455	71.73	36.275	0.0225981	8197.46	73
14.75	28.06	13.31	0.15270447	20324.96	11.74	23.59	11.85	0.22735929	26942.08	74
32.8	55.005	22.205	0.00727639	1615.72	33.48	47.785	14.305	0.01696925	2427.45	75
22.985	46.1	23.115	0.05858372	13541.63	20.005	58.095	38.09	0.07280791	27732.53	76
5.71	9.08	3.37	0.04997137	1684.04	5.37	8.83	3.46	0.05963771	2063.46	77
12.62	34.4	21.78	0.12936514	28175.73	12.02	32.74	20.72	0.18577408	38492.39	78
34.235	42.23	7.995	0.20769879	16605.52	33.3	40.6	7.3	0.07308064	5334.89	79
36.505	47.325	10.82	0.04654468	5036.13	35.305	48.505	13.2	0.03281788	4331.96	80
20.365	29.945	9.58	0.07184915	6883.15	19.175	42.535	23.36	0.05179474	12099.25	81
33.14	72.004	38.864	0.01673498	6503.88	31.204	62.716	31.512	0.0118275	3727.08	82
21.04	34.66	13.62	0.05871107	7996.45	22.68	35.94	13.26	0.06091069	8076.76	83
30.915	45.92	15.005	0.04320227	6482.50	33.16	50.905	17.745	0.05871875	10419.64	84
25.14	49.995	24.855	0.00343744	854.38	37.175	49.755	12.58	0.00688517	866.15	85
2.72	12.74	10.02	0.01092661	1094.85	2.92	13.14	10.22	0.01081602	1105.40	86
27.21	42.1	14.89	0.01084035	1614.13	27.915	49.79	21.875	0.0050726	1109.63	87
9.74	28.32	18.58	0.02366101	4396.21	9.56	31.555	21.995	0.02266831	4985.89	88
37.195	73.84	36.645	0.00497502	1823.10	40.51	72.89	32.38	0.00346344	1121.46	89
15.98	32.26	16.28	0.04398925	7161.45	18.32	32.06	13.74	0.0440234	6048.82	90
13.99	40.03	26.04	0.01368896	3564.60	13.69	30.47	16.78	0.03327343	5583.28	91
25.07	28.77	3.7	0.09703601	3590.33	25.915	34.8	8.885	0.04466121	3968.15	92
32.54	70.21	37.67	0.00343312	1293.26	29.285	65.115	35.83	0.00708211	2537.52	93
5.285	36.7	31.415	0.00757165	2378.63	3.765	35.62	31.855	0.00824327	2625.89	94
19.635	25.355	5.72	0.12359627	7069.71	17.585	32.235	14.65	0.04075439	5970.52	95
1.03	5.26	4.23	0.16272184	6883.13	1.075	5.995	4.92	0.11404755	5611.14	96
17.08	40.17	23.09	0.04217397	9737.97	24.405	43.73	19.325	0.03069671	5932.14	97
9.56	36.76	27.2	0.00458678	1247.60	19.32	36.4	17.08	0.00358795	612.82	98
30.655	63.63	32.975	0.00020533	67.71	30.77	82.205	51.435	0.0002303	118.46	99
19.735	76.56	56.825	0.00039582	224.93	19.385	73.55	54.165	0.00038444	208.23	100
23.04	73.55	50.51	0.00104958	530.14	28.11	75.915	47.805	0.00068024	325.19	101
42.735	67.01	24.275	0.00076192	184.96	43.16	67	23.84	0.00071286	169.95	102
5.34	32.64	27.3	0.00234705	640.75	2.06	41.5	39.44	0.00108333	427.27	103
50.95	93.67	42.72	0.00012855	54.92	47.32	94.11	46.79	0.00013006	60.85	104
24.885	64.275	39.39	9.4534E-05	37.24	21.48	60.78	39.3	9.9575E-05	39.13	105
6.115	31.33	25.215	0.0002554	64.40	7.56	38.16	30.6	0.00012677	38.79	106
1.96	26.9	24.94	0.00125084	311.96	1.1	27.38	26.28	0.00160359	421.42	107